



Sistema de Visão Termográfica para Veículos Autónomos Aéreos

CARLOS MANUEL DE SOUSA FERRÁS

Agosto de 2021



Sistema de Visão Termográfico para Veículos Autónomos Aéreos

Carlos Manuel de Sousa Ferrás
Nº 1110349

Mestrado em Engenharia Eletrotécnica e de Computadores
Área de Especialização de Sistemas Autónomos

Departamento de Engenharia Eletrotécnica

Instituto Superior de Engenharia do Porto

2021



Dissertação, para satisfação dos requisitos do Mestrado em
Engenharia Electrotécnica e de Computadores

Carlos Manuel de Sousa Ferrás

N^o 1110349

Orientador: André Miguel Pinheiro Dias

Mestrado em Engenharia Electrotécnica e de Computadores
Área de Especialização de Sistemas Autónomos
Departamento de Engenharia Electrotécnica
Instituto Superior de Engenharia do Porto

27 de agosto de 2021

Aos meus pais, esposa e família ...

Abstract

Visual perception systems are one of the main sources of sensory information used by autonomous systems, mainly for location, navigation and special information about the means of operation where it is located. These sensors allow the acquisition of a large amount of information about the environment in which the system finds itself, which can then be processed to acquire information relevant to the task in question. One of the information that can be obtained using vision systems is the temperature of a certain object/body. This information can be acquired using an IR camera. There are many objects that emit infrared radiation as a function of temperature and the higher the temperature the greater the intensity of radiation emitted by that object/body. This information can be useful in several applications, such as: gas detection, fire detection and surveillance, among others.

However, despite providing important complementary information to visible spectrum images, it has some limitations such as capturing images in the dark, and also the high price of these systems.

Observing that there are more and more low-cost vehicles capable of taking advantage of these systems, such as UAVs, for various operations (for example, observation or search and rescue missions), it is interesting to develop a small and efficient solution. This will allow its application in more and more vehicles, reducing the cost of the various operations that benefit from the use of these sensors.

Using a low cost CMOS IR sensor, Lepton 3.5, the necessary hardware and software for the acquisition of data from this sensor was developed, through *Ethernet*, which can be integrated with the ROS framework. Increasingly, ROS is an excellent solution in the scope of autonomous systems, allowing the sensor to be integrated in any autonomous system that has a ROS version compatible with the developed software.

The developed system has been subjected to laboratory tests that allow comparing

its results with those of a system which was known. In addition, the low-cost IR system was integrated into the autonomous aerial vehicle, which confirms its good functioning and possibility of application in various application scenarios.

This dissertation aimed to develop a low-cost thermographic system that can be integrated with the existing ROS architecture in robots. This allows that, since the autonomous system has the ROS framework, its integration is simple, fast and mainly low cost and with good results when compared to high cost systems.

Keywords: IR camera, thermography, UAV

Resumo

Os sistemas de percepção visual são das principais fontes de informação sensorial utilizadas por sistemas autônomos, principalmente para localização, navegação e a recolha de diferentes informações sobre os meios de operação onde se encontra. Estes sensores permitem a aquisição de uma grande quantidade de informação sobre o ambiente em que o sistema se encontra, podendo depois ser processada para extrair informação relevante para a tarefa em questão. Uma das informações que pode ser obtida ao recorrer a sistemas de visão é a temperatura de um determinado objeto/corpo. Esta informação pode ser adquirida recorrendo a uma câmara IR. Existem muitos objetos que emitem radiação infravermelha em função da temperatura e quanto mais alta a temperatura maior é a intensidade da radiação emitida por esse objeto/corpo. Esta informação pode ser útil em diversas aplicações, tais como: deteção de gases, deteção de fogos e vigilância, entre outros.

Contudo, apesar de fornecerem informação complementar importante às imagens do espectro visível, tem algumas limitações tais como a captura de imagens no escuro, e ainda o preço elevado destes sistemas.

Considerando que cada vez mais existem mais veículos a baixo custo capazes de tirar proveito destes sistemas, como os UAVs, para diversas operações (por exemplo, missões de monitorização ou busca e salvamento), torna-se interessante o desenvolvimento de uma solução pequena e de baixo custo. Isto irá permitir a sua aplicação em cada vez mais veículo, diminuindo o custo das diversas operações que beneficiam destes sensores.

Assim sendo, recorrendo a um sensor CMOS IR de baixo custo, Lepton 3.5, desenvolveu-se o *hardware* e *software* necessários para a aquisição de dados deste sensor, através de *Ethernet*, integrável com a *framework* ROS. Cada vez mais o ROS se tem demonstrado uma excelente aposta no âmbito dos sistemas autônomos, permitindo assim que o sensor seja integrado em qualquer sistema autónomo que tenha uma versão ROS compatível

com o *software* desenvolvido.

O sistema desenvolvido foi sujeito a testes em laboratório que permitiram comparar os seus resultados com os de um sistema cuja precisão era conhecida. Além disso, realizou-se ainda a integração do sistema *low-cost* IR no veículo autónomo aéreo, o que permitiu confirmar o seu bom funcionamento e possibilidade de aplicação em vários cenários de aplicação.

A presente dissertação visou o desenvolvimento de um sistema de visão termográfica de baixo custo, integrável à arquitetura ROS já existente nos robôs. Isto permite que, desde que o sistema autónomo tenha a framework ROS, a sua integração seja simples, rápida, e principalmente de baixo custo e com bons resultados quando comparado com sistemas de elevado custo.

Palavras-Chave: Câmara IR, termografia, UAV

Agradecimentos

Gostaria de usar esta secção para, em primeiro lugar, agradecer ao meu orientador Eng^o André Dias por me ter proporcionado esta oportunidade e pelo suporte e ajuda disponibilizada ao longo da dissertação.

A todos as pessoas que trabalham no Laboratório de Sistemas Autónomos (LSA), com quem aprendi muito ao longo do meu percurso.

A todos os meus amigos e colegas de curso que me acompanharam no decorrer desta longa jornada, queria agradecer-lhes pelos bons momentos passados durante todo o mestrado, assim como tudo aquilo que me ensinaram.

Aos meus padrinhos, pelo amor, incentivo e interesse ao longo de toda a minha jornada académica.

À minha irmã, cunhado, sobrinho e afilhado, pela motivação e carinho que sempre me deram ao longo desta etapa.

À minha esposa, Sara Freitas, pelo apoio constante, carinho e força para que terminasse com sucesso esta etapa da minha vida académica. O apoio dela foi fundamental para conseguir encontrar o ânimo necessário, principalmente nos dias mais complicados, em que ela estava sempre presente para me incentivar a trabalhar um pouco mais para encerrar esta etapa.

Para terminar, quero agradecer aos meus pais, pela educação que me proporcionaram, pelo incentivo e por todos os esforços que fizeram para a minha formação académica.

Esta página foi intencionalmente deixada em branco.

Conteúdo

Abstract	ii
Resumo	iv
Agradecimentos	v
Lista de Figuras	xi
Lista de Tabelas	xv
Lista de Acrónimos	xviii
1 Introdução	1
1.1 Motivação	3
1.2 Cenários de aplicação	4
1.3 Objetivos	6
1.4 Estrutura	7
2 Estado da Arte	9
2.1 Radiação infravermelha	9
2.2 Câmaras Infrared (IR)	13
2.3 Parâmetros que definem a qualidade de uma imagem térmica	15
2.3.1 Resolução	15
2.3.2 Sensibilidade térmica	16
2.3.3 NUC	18
2.4 Soluções comerciais	19
2.4.1 Câmaras IR	19

2.4.2	CMOS termográficos	22
2.4.3	Comparação das características das câmaras e CMOS termográficos apresentadas em 2.4.1 e 2.4.2	24
2.5	Resumo do capítulo	25
3	Fundamentos Teóricos	27
3.1	Fatores que influenciam as medições radiométricas de temperatura	27
3.1.1	Radiometria e características da superfície	27
3.1.2	Emissividade	28
3.1.3	Refletividade	30
3.1.4	Efeito da atmosfera	31
3.1.5	Resolução	32
3.2	Calibração	35
3.2.1	Método de calibração radiométrica proposto pela FLIR	36
3.2.2	Método de calibração radiométrica Low-Cost	36
3.3	Resumo do capítulo	37
4	Arquitectura geral do sistema	39
5	Implementação	43
5.1	Hardware	43
5.1.1	Lepton 3.5	43
5.1.2	Raspberry Pi 4	47
5.1.3	Custos de produção do hardware	48
5.2	Caixa Raspberry Pi	49
5.3	Sensor CMOS Lepton 3.5	50
5.3.1	Modos de operação	50
5.3.2	Controlo do sensor através do protocolo CCI	54
5.3.3	Transferência de vídeo - VoSPI	61
5.4	Driver aquisição	67
5.5	Interface gráfica	75
6	Resultados	81
6.1	Resultados laboratoriais	81
6.1.1	Distância entre Lepton 3.5 e superfície da água - 15.5 cm	83

6.1.2	Distância entre Lepton 3.5 e superfície da água - 33.5 cm	92
6.2	Integração do sistema <i>low-cost</i> IR no veículo autónomo aéreo	101
6.3	Resumo do capítulo	107
7	Conclusão e trabalho futuro	109
	Bibliografia	111

Esta página foi intencionalmente deixada em branco.

Lista de Figuras

1.1	Exemplo de duas imagens retiradas, no mesmo cenário, com um sensor óptico de espectro visível, 1.1a, e outra com um sensor IR, 1.1b.	3
1.2	Alguns dos veículos desenvolvidos no Laboratório de Sistemas Autônomos (LSA).	3
1.3	Exemplo de aplicações de um sensor IR.	6
2.1	Espectro eletromagnético com as várias divisões do espectro infravermelho [1].	10
2.2	Regiões do espectro infravermelho e adjacentes com vista ampliada sobre a região infravermelha térmica [2].	11
2.3	Transmissão atmosférica nos diferentes comprimentos de onda.	12
2.4	Potência emissiva de um corpo negro de acordo com o seu comprimento de onda a diversas temperaturas [3].	13
2.5	Diagrama genérico de uma câmara infravermelha [4].	14
2.6	Vista transversal de um microbolómetro.	15
2.7	Imagens térmicas em escala de cinzas, 2.7a, e em pseudo-cores, 2.7b e 2.7c [5].	15
2.8	Resoluções <i>standard</i> dos fabricantes de câmaras IR [6].	16
2.9	Ruído temporal.	17
2.10	Função de temperatura NETD.	18
2.11	Diferença entre NETD.	18
3.1	Ilustração da influência que a atmosfera e a superfície podem ter na medição de temperatura.	28

3.2	Imagem térmica de uma casa com diferentes tipos de materiais de construção.	30
3.3	As medições radiométricas de temperatura devem evitar medições diretas para reduzir a reflexão direta da câmara e evitar ângulos oblíquos de modo a reduzir a reflexão geral.	32
3.4	A humidade atmosférica, como o nevoeiro, podem reduzir muito o alcance da deteção de uma câmara termográfica. De notar que, na Figura 3.4b, podemos observar os reflexos térmicos da pessoa e do edifício na superfície da água, efeito já referido no capítulo 3.1.3.	33
3.5	O efeito <i>spot-size</i> , causado pelas características óticas e físicas da câmara, é mais relevante quando se pretende fazer medições radiométricas de temperatura remotamente.	34
3.6	O número de pixeis usados para determinar a área da superfície de um objeto depende da densidade do pixel (p), comprimento focal (f), distância da câmara à superfície (d) e o menor tamanho característico (s) (comprimento, diâmetro) da área da superfície.	35
4.1	Lepton 3.5.	41
4.2	Arquitetura geral do sistema.	41
5.1	<i>Pinout</i> Lepton 3.5.	44
5.2	Reguladores de tensão de alimentação da Lepton 3.5.	44
5.3	<i>Clock</i> interno Lepton 3.5.	45
5.4	Sinais disponibilizados para o exterior pela Lepton 3.5.	45
5.5	Várias perspetivas da PCB final da Lepton 3.5.	46
5.6	Ligações entre a Lepton 3.5 e a Raspberry Pi 4.	47
5.7	Várias perspetivas da PCB final da Raspberry Pi 4.	48
5.8	Várias perspetivas da caixa construída para a Raspberry Pi 4.	50
5.9	Exemplo de efeitos de degradação de imagens térmicas sem o uso de FFC.	52
5.10	Ilustração hipotética da saída do sensor <i>versus</i> temperatura do sensor.	53
5.11	Comparação do método AGC linear vs método implementado pela FLIR na Lepton 3.5.	54
5.12	Registo CCI da Lepton 3.5.	55
5.13	Formato <i>Command ID</i>	56

5.14	Formato registo <i>Status</i>	57
5.15	Envio sequencial para o sensor usando a interface CCI.	58
5.16	Exemplo de leitura de um registo do sensor usando a interface CCI.	59
5.17	Comparação entre imagens obtidas em Raw14 e em RGB888.	62
5.18	Composição da <i>frame</i> VoSPI com e sem telemetria.	64
5.19	Estrutura do pacote VoSPI.	64
5.20	Estrutura do cabeçalho do pacote VoSPI.	65
5.21	Exemplo de um pacote VoSPI válido, com o número 20 pertencente ao segmento 3.	65
5.22	Exemplo de um pacote VoSPI inválido.	65
5.23	Codificação do valor de cada pixel no modo Raw14.	66
5.24	Codificação do valor de cada pixel no modo RGB888.	66
5.25	Exemplos de transgressões que geram perda de sincronismo na Lepton 3.5.	67
5.26	Fluxograma da main do driver de aquisição.	68
5.27	Fluxograma <i>thread: get_frames_thread</i>	69
5.28	Fluxograma <i>thread: publish_image_raw_thread</i>	70
5.29	Fluxograma função: <i>transfer_segment()</i> , Parte 1.	71
5.30	Fluxograma função: <i>transfer_segment()</i> , Parte 2.	72
5.31	Fluxograma função: <i>transfer_segment()</i> , Parte 3.	73
5.32	Fluxograma função: <i>transfer_segment()</i> , Parte 4.	74
5.33	Estrutura de uma mensagem do tipo <i>sensor_msgs/Image.msg</i>	75
5.34	<i>std_msgs/Header.msg</i> - Raw Message Definition.	75
5.35	FLIR Lepton Interface - Main Tab Init.	76
5.36	FLIR Lepton Interface - Main Tab Connect.	77
5.37	FLIR Lepton Interface - Lepton Image 1.	78
5.38	FLIR Lepton Interface - Lepton Image 2.	79
5.39	FLIR Lepton Interface - Diferentes tipos de <i>colormaps</i>	80
6.1	Sensor de temperatura submersível DS18B20.	82
6.2	Suporte que permitiu colocar o sistema <i>low-cost</i> IR a uma distância de, aproximadamente, 15.5 cm da superfície da água.	83
6.3	Imagem térmica da água à temperatura ambiente com o suporte a 15.5 cm.	84
6.4	Evolução da medição de temperatura com água à temperatura ambiente a 15.5 cm durante 1h.	85

6.5	Boxplot obtido para o sensor CMOS Lepton 3.5 (1) e sonda (2), respectivamente, com água à temperatura ambiente a 15.5 cm durante 1h.	85
6.6	Imagem térmica da água quente com o suporte a 15.5 cm.	87
6.7	Evolução da medição de temperatura com água quente a 15.5 cm durante 1h.	88
6.8	Boxplot obtido para o sensor CMOS Lepton 3.5 (1) e sonda (2), respectivamente, com água quente a 15.5 cm durante 1h.	88
6.9	Imagem térmica da água fria com o suporte a 15.5 cm.	90
6.10	Evolução da medição de temperatura com água fria a 15.5 cm durante 1h.	91
6.11	Boxplot obtido para o sensor CMOS Lepton 3.5 (1) e sonda (2), respectivamente, com água fria a 15.5 cm durante 1h.	91
6.12	Suporte que permitiu colocar o sistema <i>low-cost</i> IR a uma distância de, aproximadamente, 33.5 cm da superfície da água.	92
6.13	Imagem térmica da água à temperatura ambiente com o suporte a 33.5 cm.	93
6.14	Evolução da medição de temperatura com água à temperatura ambiente a 33.5 cm durante 1h.	94
6.15	Boxplot obtido para o sensor CMOS Lepton 3.5 (1) e sonda (2), respectivamente, com água à temperatura ambiente a 33.5 cm durante 1h.	95
6.16	Imagem térmica da água quente com o suporte a 33.5 cm.	96
6.17	Evolução da medição de temperatura com água quente a 33.5 cm durante 1h.	97
6.18	Boxplot obtido para o sensor CMOS Lepton 3.5 (1) e sonda (2), respectivamente, com água quente a 33.5 cm durante 1h.	97
6.19	Imagem térmica da água fria com o suporte a 33.5 cm.	99
6.20	Evolução da medição de temperatura com água fria a 33.5 cm durante 1h.	100
6.21	Boxplot obtido para o sensor CMOS Lepton 3.5 (1) e sonda (2), respectivamente, com água fria a 33.5 cm durante 1h.	100
6.22	Imagens do STORK com o sistema <i>low-cost</i> IR integrado.	102
6.23	Tipo de <i>color map</i> utilizado para visualização do log de voo.	103
6.24	Imagem obtida durante o voo - Parte 1.	104
6.25	Imagem obtida durante o voo - Parte 2.	105
6.26	Imagem obtida durante o voo - Parte 3.	106
6.27	Imagem obtida durante o voo - Parte 4.	106

Lista de Tabelas

2.1	Sub-divisões da radiação IR	10
2.2	Características da câmara IR, Raytheon L-3 Thermal-Eye 2000AS, usada em [7]	20
2.3	Características da câmara IR, Raytheon L-3 Thermal-Eye ControlIR 300D, usada em [8]	21
2.4	Características da câmara IR, BIRD-640 SCD Core, usada em [9]	22
2.5	Características da câmara IR, FLIR Lepton 2.5, usada em [10]	23
2.6	Características da câmara IR, FLIR Lepton 3, usada em [11]	24
2.7	Tabela com as principais características das câmaras IR apresentadas no capítulo 2.4	24
3.1	Tabela de emissividade de alguns materiais mais comuns	31
4.1	Características do sensor CMOS, FLIR Lepton 3.5	40
5.1	Tabela de custos associados à produção do sistema <i>low-cost</i> IR	49
5.2	Resumo do tamanho dos dados VoSPI em relação aos recursos usados	63
6.1	Registo de temperatura da divisão no teste com água à temperatura ambiente, a uma distância de 15.5 cm	85
6.2	Registo de temperatura da divisão no teste com água quente, a uma distância de 15.5 cm	87
6.3	Registo de temperatura da divisão no teste com água fria, a uma distância de 15.5 cm	90
6.4	Registo de temperatura da divisão no teste com água à temperatura ambiente, a uma distância de 33.5 cm	94

6.5	Registo de temperatura da divisão no teste com água quente, a uma distância de 33.5 cm	97
6.6	Registo de temperatura da divisão no teste com água fria, a uma distância de 33.5 cm	99
6.7	Tabela com as principais características das câmaras IR utilizadas nos testes <i>outdoor</i>	101
6.8	Tabela com as características da lente usada pela Teledyne Dalsa Calibir GX	103

Lista de Siglas e Acrónimos

AGC Automatic Gain Control

API Application Programming Interface

CCI Command and Control Interface

CMOS Complementary Metal Oxide Semiconductor

FFC Flat-Field Correction

FIR Far-infrared

FOV Field of View

FPA Focal Plane Array

GenICam Generic Interface for Cameras

GPS Global Positioning System

HFOV Horizontal Field of View

IMU Inertial Measurement Unit

IR Infrared

ISEP Instituto Superior de Engenharia do Porto

LiDAR Light detection and Ranging

LSA Laboratório de Sistemas Autónomos

LW Long-wave

LWIR	Long-wavelength infrared
MW	Mid-wave
MWIR	Mid-wavelength infrared
NETD	Noise Equivalent Temperature Difference
NIR	Near-infrared
NTD	Non-destructive technique
NUC	Non-uniformity correction
OpenCV	Open Source Computer Vision
OGI	Optical Gas Imaging
ROI	Region of Interest
ROS	Robot Operating System
RGB	Red-Green-Blue
RH	Relative Humidity
SLAM	Simultaneous Localization and Mapping
SPI	Serial Peripheral Interface
SW	Short-wave
SWIR	Short-wavelength infrared
UAV	Unmanned Aerial Vehicle
VoSPI	Video over SPI

Capítulo 1

Introdução

Os sistemas autónomos são sistemas que necessitam de informação adquirida pelos mesmos, de forma a conseguirem deliberar sobre as ações a tomar para conseguir desempenhar as suas funções. Assim sendo, estes tipo de sistemas robóticos depende em grande escala de informação sensorial para desempenhar as suas funções. Alguns dos sensores utilizados em sistemas de robóticos são:

- Sensores de visão (câmaras) [12];
- Sistemas Light detection and Ranging (LiDAR) [13];
- Sistemas Global Positioning System (GPS) [14];
- Sistemas Inertial Measurement Unit (IMU) [15].

Um das principais fontes de informação sensorial utilizada em muitos sistemas robóticos são sistemas baseados em visão [16] [17]. Através destes sistemas, é possível obter vastas quantidades de informação acerca do meio envolvente do robô, permitindo-lhe assim navegar nesse meio e efetuar as suas tarefas.

A extração da informação para a navegação com base nos dados das câmaras é alcançada recorrendo a técnicas de visão computacional. Através do processamento das imagens é possível detetar objetos, reconhecer marcas no terreno, e obter informação acerca da posição de objetos relativamente ao robô. Existem múltiplas abordagens em visão computacional para a obtenção de informação tridimensional, sendo uma delas a visão stereo. Para obter a informação tridimensional de um objeto, é necessário um par de imagens do objeto com uma câmara em perspetivas diferentes, ou de múltiplas câmaras em posições diferentes. Extraindo um conjunto de pontos do objeto em ambas

as imagens e, admitindo que esses pontos são iguais em ambas as imagens, ou seja, existe correspondência entre os pontos de ambas as imagens, é possível determinar a posição tridimensional desses pontos, recorrendo a técnicas, como por exemplo: triangulação e retificação.

Neste sentido, durante as duas últimas décadas o desenvolvimento de sistemas de visão computacional aumentou consideravelmente. Nestes sistemas, os sensores óticos de espectro visível são os mais utilizados, sendo que estes captam a luz refletida pelos objetos na gama do espectro visível, representando os resultado numa imagem de escala de cinza ou Red-Green-Blue (RGB).

Assim sendo, caso não exista nenhuma fonte de energia disponível, tal como o sol ou iluminação artificial, este tipo de sensor não é capaz de adquirir informação. A questão da iluminação do objeto levanta os maiores desafios da utilização de câmaras de espectro visível:

- A obtenção de informação relevante na imagem depende da iluminação existente, sendo que no caso extremo em que não existe iluminação não é possível captar informação relevante;
- Dependendo da iluminação existente é possível captar a informação com melhor ou pior qualidade, por exemplo, no caso de uma iluminação deficiente a imagem será de fraca qualidade;
- O equilíbrio das cores, sendo que dependendo das características do material em conjunto com a fonte de iluminação este pode acabar por não refletir corretamente a sua cor;
- A direção de incidência da luz que pode influenciar a aparência do objeto.

De maneira a ultrapassar algumas destas limitações e adicionar mais informação à imagem, foram desenvolvidos outros sensores para serem integrados nos sistemas de visão computacional, tais como os sensores IR. Este tipo de sensores permitem captar a radiação eletromagnética que é invisível ao olho humano e representar a informação numa imagem de espectro visível. Existem muitos objetos que emitem radiação infravermelha em função da temperatura: quanto mais alta a temperatura maior é a intensidade da radiação emitida por esse objeto/corpo.

Na Figura 1.1 é possível observar duas imagens, uma captada por um sensor ótico de espectro visível e outra captada por um sensor IR.

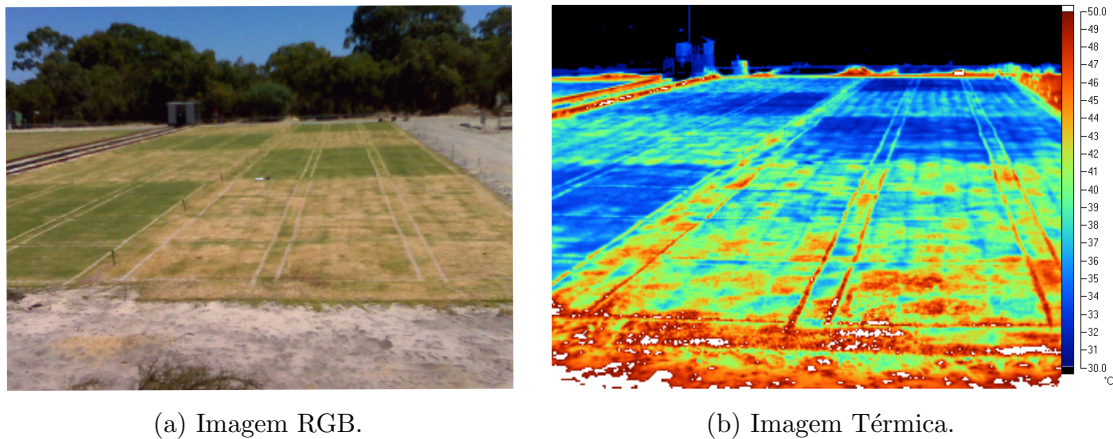


Figura 1.1: Exemplo de duas imagens retiradas, no mesmo cenário, com um sensor ótico de espectro visível, 1.1a, e outra com um sensor IR, 1.1b.

Existem já diversos cenários de aplicação que contam com este tipo de tecnologia, como a inspeção de construções [18, 19], detecção de gases [20, 21], aparelhos industriais [22, 23], medicina veterinária [24, 25], agricultura [26, 27], detecção de fogos e vigilância [28, 29].

1.1 Motivação

O LSA tem estado envolvido em diversos projetos inovadores nos últimos anos, principalmente no meio aquático e no meio aéreo. Alguns destes projetos resultaram em diversos sistemas autónomos, tais como o ROAZ II, EVA e STORK, que se encontram na Figura 1.2. Estes tem sido utilizados para missões de monitorização, busca e salvamento, entre outros.

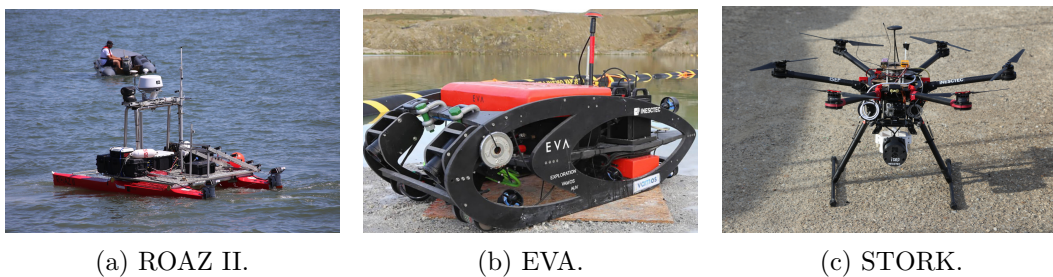


Figura 1.2: Alguns dos veículos desenvolvidos no LSA.

De maneira a conseguirem obter informação do meio que os rodeia, estes veículos são equipados com diversos sensores, que lhes permitem realizar a perceção do meio

envolvente, a consequente navegação autónoma e controlo dos diversos sistemas com base na situação detetada.

Um dos sensores com mais cenários de aplicação são as câmaras IR, que integram um número considerável de veículos. Contudo, estes sensores tem um preço elevado, o que dificulta a sua rápida integração nos diversos veículos.

Assim sendo, o desenvolvimento de um sistema de visão termográfica de baixo custo torna-se uma opção viável para facilitar o acesso à integração deste tipo de sensores na maior parte dos veículos. Nesse sentido esta dissertação irá procurar responder a essa necessidade do laboratório no desenvolvimento de um sistema de visão termográfico que possa ser integrado nos veículos autónomos já existentes no laboratório.

1.2 Cenários de aplicação

Cada vez mais o Ser Humano pretende não se envolver em missões que coloquem em risco a sua própria vida, e por isso mesmo é que tem vindo a desenvolver soluções para que esse tipo de tarefas possam ser executadas com o menor risco possível. Além disso, existem ainda tarefas repetitivas que caso possam ser automatizadas permitem libertar recursos que podem ser necessários em outras tarefas mais complexas. Alguns exemplos deste tipo de tarefas são a patrulha de fronteiras marítimas [30] e florestas [31], inspeção de linhas de alta tensão, fugas de gás, entre outras. Se todas estas tarefas fossem automáticas e apenas necessitassem de um Humano para a supervisão da missão e de resultados, diminuiria consideravelmente o número de pessoas necessárias para a execução da tarefa, diminuindo os custos e aumentando o número de pessoas disponíveis para a realização de outras tarefas.

Por estes motivos, tem-se assistido a um aumento do número de aplicações autónomas para a execução de tarefas como as descritas anteriormente, impulsionando o desenvolvimento de novos sensores com tamanho mais reduzido, mais eficientes energeticamente e com custo mais baixo. Um dos exemplos destes sensores são os sensores infravermelhos, que atualmente são utilizadas em inúmeras aplicações, tais como:

- Inspeção de edifícios - Com o crescer da nossa sociedade a tendência será termos cada vez mais edifícios de larga escala, onde a inspeção de um telhado pode demorar horas ou até dias para ficar concluída. Se esta tarefa for realizada autonomamente, recorrendo a um Unmanned Aerial Vehicle (UAV), o edifício pode ser inspecionado numa fração do tempo necessário anteriormente, detetando problemas de isolamento, estruturais ou até mesmo infiltrações [32], tal como pode ser

observado na Figura 1.3a onde se encontra representado a inspeção de um edifício e na Figura 1.3f onde é possível observar a inspeção de telhados recorrendo a estes sensores;

- Campos de painéis solares - Esta é outra área onde um grande campo solar pode ser inspecionado numa fração do tempo (e custo) recorrendo a um UAV, em comparação com o que é necessário para uma inspeção terrestre. Além da eficiência obtida pela inspeção de grandes campos solares por um UAV e uma câmara termográfica, as inspeções aéreas também permitem aos técnicos monitorizar eventuais falhas ao longo do tempo. Na Figura 1.3d encontra-se representado um exemplo de inspeção de painéis solares;
- Centrais de distribuição elétrica - As subestações podem ser inspecionadas de todos os ângulos sem ter que desligar o equipamento mantendo o UAV fora da linha de vedação. Os componentes suspeitos podem ser inspecionados em detalhe, se necessário, mas as inspeções com UAVs podem economizar horas, eliminando a necessidade de inspecionar cada componente individualmente, permitindo que o utilizador se concentre em áreas com anomalias conhecidas. Da mesma forma, as linhas de distribuição que estão em áreas acidentadas e difíceis de alcançar podem ser inspecionadas com segurança por UAVs numa fração do custo do uso de helicópteros tripulados. Na Figura 1.3b encontra-se um exemplo da inspeção de ativos elétricos realizada com recurso a câmaras IR;
- Exploração de Petróleo e Gás - Esta aplicação recai em duas áreas: inspeção de refinarias e inspeção de *pipelines*. Inspeccionar refinarias usando UAVs equipados com sensores de Optical Gas Imaging (OGI) é rápido e eficaz. A inspeção de uma *pipeline* feita com aviões de asa fixa têm uma resistência muito maior comparativamente aos *drones*, e que combina muitos dos benefícios já descritos anteriormente. Este tipo de operação, normalmente, custam uma pequena fração de aeronaves tripuladas, podendo ser obtidas múltiplas imagens sobrepostas que posteriormente serão usadas para reconstrução 3D da respetiva *pipeline*. Essas imagens dão uma visão geral da sua infra-estrutura, além de imagens detalhadas de falhas, e possíveis pontos problemáticos para serem analisados ao longo do tempo e fornecer informações sobre o ciclo de vida dos componentes envolvidos [9]. Na Figura 1.3e é possível observar um exemplo de inspeção de condutas de gás;
- Segurança pública - Os UAVs com câmaras termográficas podem ser usados para realizar operações de combate a incêndios estruturais e incêndios florestais em

áreas mais confinadas. Um dos maiores recursos de uma câmara termográfica nestes cenários é a capacidade de recolher informação através do fumo para que seja possível obter mais informação sobre o estado e evolução do incêndio. Também podem ser uma preciosa ajuda durante as operações de limpeza e rescaldo para encontrar *hot spots* subterrâneos que podem reativar dias ou até semanas depois. A área com maior adoção de câmaras térmicas na indústria dos UAVs é busca e salvamento. E aqui os benefícios são óbvios e já foram provados ao longo das décadas [8], sendo possível observar um exemplo desta aplicação na Figura 1.3f.

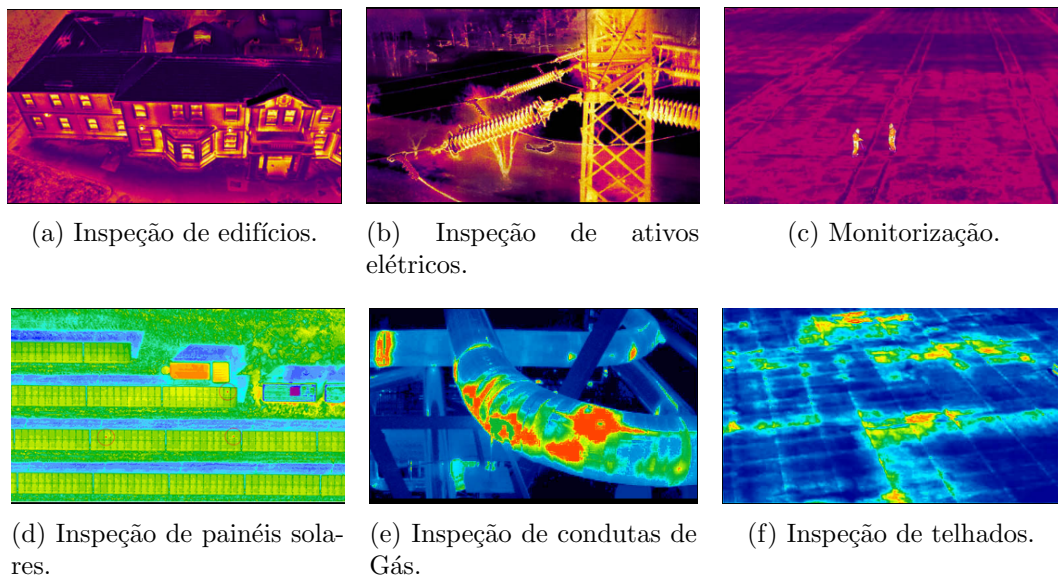


Figura 1.3: Exemplo de aplicações de um sensor IR.

1.3 Objetivos

Um sistema de visão termográfico pode ser instalado em diferentes veículos autónomos, tais como aéreos, aquáticos de superfície e terrestres, existindo diversas aplicações para a utilização destes sistemas.

Assim sendo, o principal objetivo desta dissertação baseia-se no desenvolvimento de um novo sistema de visão termográfico, de baixo custo e fácil integração nos sistemas já existentes. Desta forma, torna-se necessário efetuar uma pesquisa das aplicações atuais dos sensores IR em veículos autónomos, tendo em conta as especificações dos sensores utilizadas em cada aplicação, assim como alguns tópicos em que a utilização de sensores

IR pequenos e com baixo consumo energético possa ser vantajosa em relação às soluções atuais.

Contudo, torna-se necessário dividir este estudo em diversos tópicos, de maneira a definir um conjunto de objetivos que permita atingir o objetivo principal:

- Desenvolvimento do *hardware* e *firmware* capaz de recolher os dados do sensor IR e envia-los por Ethernet, para que posteriormente possam ser integrados na *framework* de software já existentes nos robôs;
- A câmara termográfica a desenvolver tem que ser integrável com a arquitetura já existente do robô;
- Desenvolvimento de uma câmara termográfica de baixo custo, que seja uma solução leve e pequena, e que tenha baixos consumos energéticos;
- Validação da solução desenvolvida em laboratório com recurso a testes comparativos com sistemas de visão termográficos comerciais;
- Efetuar testes experimentais num cenário real, com o sistema de visão integrado num veículo autónomo aéreo.

1.4 Estrutura

No segundo capítulo define-se o que é a radiação IR, que tipo de câmaras IR existem, parâmetros que definem a qualidade de uma câmara IR e, por fim, apresentam-se algumas soluções que já foram desenvolvidas por outros autores para detetar semelhanças e possíveis pontos fracos.

No terceiro capítulo, são apresentados conceitos e fundamentos necessários à compreensão do funcionamento de uma câmara IR.

No quarto capítulo é apresentada a arquitetura geral do sistema que me proponho a construir nesta dissertação.

A implementação do projeto é descrita no quinto capítulo, no qual são mencionadas as diferentes etapas do software implementado.

No sexto capítulo, são apresentados os resultados obtidos ao longo do processo de implementação e teste.

Por último, no sétimo capítulo são apresentadas as conclusões e o trabalho futuro.

Esta página foi intencionalmente deixada em branco.

Capítulo 2

Estado da Arte

As câmaras infravermelhas, também conhecidas como câmaras termográficas ou simplesmente câmaras térmicas, são usadas para capturar radiação do espectro eletromagnético que os olhos humanos não conseguem ver. A radiação infravermelha foi descoberta em 1800, por William Hersche quando estudava a radiação solar. Mas só em 1900 é que Max Planck conseguiu descrever as leis da radiação térmica. Mas com o passar dos tempos e com as constantes descobertas e inovações nesta área, particularmente na tecnologia dos detetores e desenvolvimento de software cada vez mais robusto para processamento deste tipo de imagens, existem soluções de análise térmica com um custo cada vez mais baixo [2].

2.1 Radiação infravermelha

A radiação infravermelha é também conhecida como radiação térmica, isto porque todos os objetos com uma temperatura acima do zero absoluto emitem calor, ou seja, radiação infravermelha [1]. Este tipo de radiação está localizada entre a radiação visível e as micro ondas, com comprimentos de onda que podem variar desde os 0.7 até aos 1000 μm , como se pode ver pela Figura 2.1.

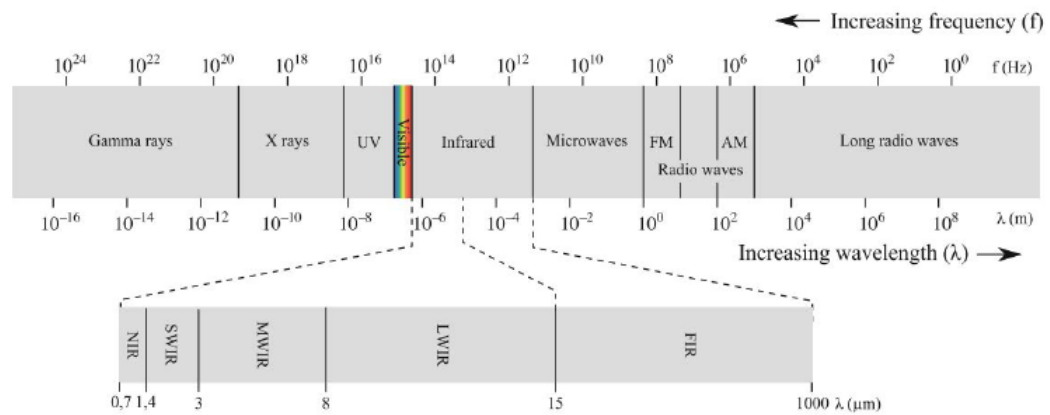


Figura 2.1: Espectro eletromagnético com as várias divisões do espectro infravermelho [1].

O espectro infravermelho pode ainda ser dividido em várias regiões espectrais. Existem diferentes sub-divisões dependendo dos campos científicos ao qual é aplicada. As divisões mais comuns são as que estão representadas na Tabela 2.1 [33] [34].

Tabela 2.1: Sub-divisões da radiação IR

Nome da divisão	Comprimento de onda (μm)
Near-infrared (NIR)	0.7 - 1.4
Short-wavelength infrared (SWIR)	1.4 - 3
Mid-wavelength infrared (MWIR)	3 - 8
Long-wavelength infrared (LWIR)	8 - 15
Far-infrared (FIR)	15 - 1000

Cada uma destas sub-divisões da radiação infravermelha tem diferentes aplicações. No caso da radiação NIR é usada em telecomunicações por fibra ótica e dispositivos de visão noturna. A radiação SWIR é usada para comunicações de longa distância. A radiação MWIR é usada em aplicações militares, tais como, mísseis teleguiados. A radiação LWIR é usada na obtenção de imagem térmica, baseando-se nas emissões térmicas dos objetos/corpos. Esta sub-divisão também é conhecida por *thermal infrared*. E a radiação FIR é usada em algumas aplicações militares e de astronomia.

Na captura de imagens térmicas nem todas as sub-divisões do espectro eletromagnético são usadas, só uma pequena parte. A Figura 2.2 mostra uma visão ampliada dessa região.

De acordo com [2], as câmaras comercializadas só estão disponíveis em três gamas espectrais, no que diz respeito a termografia. E são os seguintes:

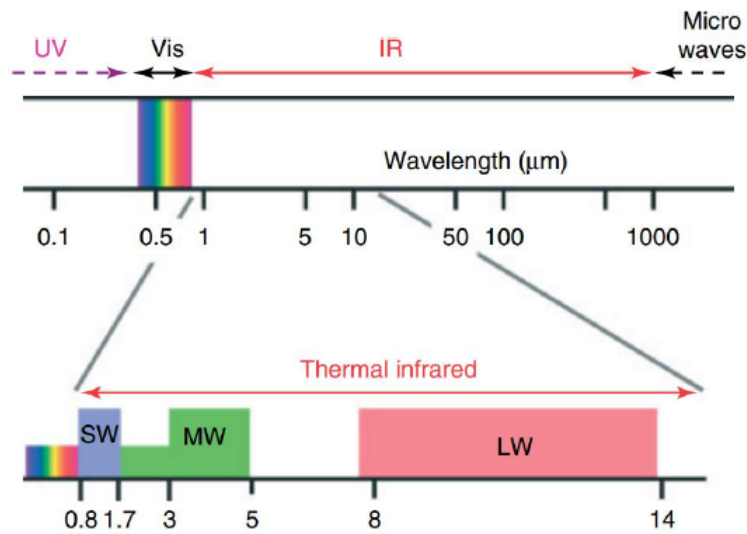


Figura 2.2: Regiões do espectro infravermelho e adjacentes com vista ampliada sobre a região infravermelha térmica [2].

- E a região Short-wave (SW) está entre os 0.8 e os 1.7 μm ;
- A região Mid-wave (MW) está entre os 3 e os 5 μm ;
- A região Long-wave (LW) está entre os 7 até aos 14 μm .

A razão pela qual grande parte do espectro de emissão IR é inutilizável para sistemas de deteção térmica é porque a radiação é absorvida pela água ou pelo dióxido de carbono presente na atmosfera, H_2O e CO_2 , respetivamente. Sendo que estas moléculas são as responsáveis pela maior parte da absorção da radiação infravermelha. A Figura 2.3 ilustra a percentagem de radiação transmitida dependendo do comprimento de onda e demonstra a molécula que é responsável pelas grandes lacunas de transmissão. Devido à grande diferença de transmissão atmosférica entre os 5 e 8 μm , não há razão para que as câmaras sejam sensíveis nesta banda. O mesmo se aplica à radiação acima de 14 μm .

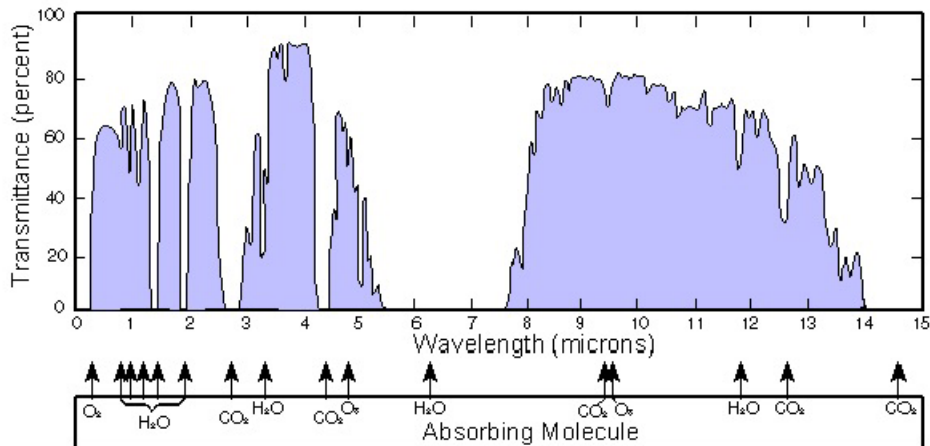


Figura 2.3: Transmissão atmosférica nos diferentes comprimentos de onda.

Como disse anteriormente, todos os objetos que tem uma temperatura acima de 0 K (-273.15 °C) emitem radiação térmica em diferentes comprimentos de onda, dependendo da temperatura e das propriedades do material. Por exemplo, um corpo negro é um emissor perfeito de radiação térmica. Como definição, um corpo negro permite que toda a radiação incidente passe por ele e seja completamente absorvida. Isto é verdade para todos os comprimentos de onda e para todos os ângulos de incidência de qualquer radiação. Daí o corpo negro ser considerado o elemento absorvente perfeito [3].

A lei de Planck, de uma maneira geral, diz que todo o corpo físico emite radiação eletromagnética. E devido à sua dependência da temperatura, a radiação de Planck é considerada a radiação térmica. A Figura 2.4 mostra a natureza espectral da lei de Planck, onde o poder de emissão de um corpo negro a várias temperaturas está relacionado com o comprimento de onda.

O conceito de emissividade é importante para entender as emissões de radiação térmica de um corpo físico. De uma maneira simples, dois objetos com diferentes emissividades e na mesma temperatura física não terão a mesma temperatura numa imagem térmica. A emissividade também depende da temperatura da superfície, bem como do comprimento de onda e do ângulo de incidência. A lei de Kirchhoff afirma que a emissividade de um corpo negro ideal é 1, isso significa que um corpo negro absorve toda a radiação.

Michael Vollmer e Klaus-Peter Mollmann publicaram um livro [2] que explica, entre outras coisas, os princípios físicos e leis sobre a radiação infravermelha ou térmica.

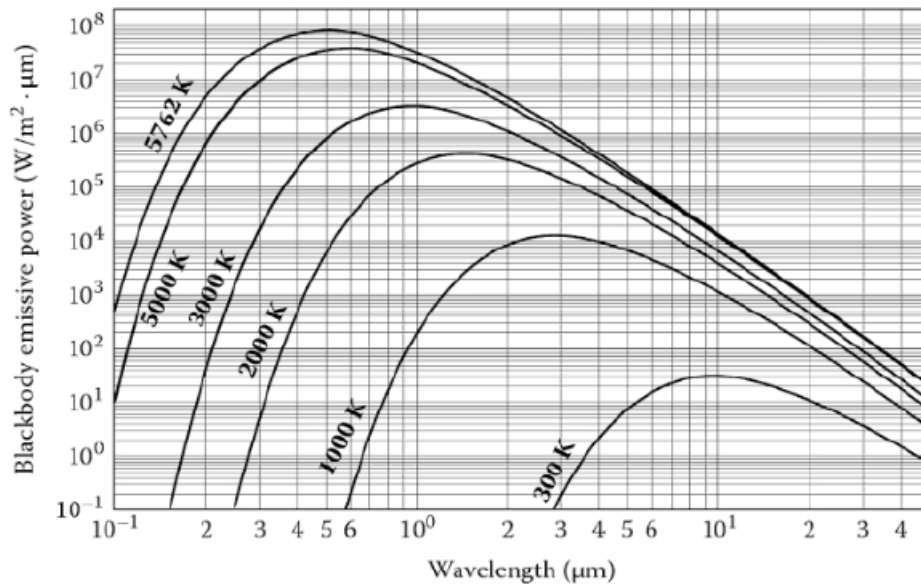


Figura 2.4: Potência emissiva de um corpo negro de acordo com o seu comprimento de onda a diversas temperaturas [3].

2.2 Câmaras IR

Desde que a radiação infravermelha foi descoberta as tecnologias que fazem uso deste tipo de radiação está em constante desenvolvimento. Esta radiação tem estado presente em diferentes aplicações nas mais diversas áreas científicas, como demonstrado no Capítulo 1.2. O desenvolvimento da primeira câmara infravermelha começou com um scanner infravermelho. Este dispositivo foi desenvolvido para ser usado no meio militar no final dos anos 40. No início dos anos 50, os visualizadores térmicos levavam uma hora para produzir uma única imagem [35].

Atualmente, as câmaras infravermelhas são dispositivos que captam um ponto ou uma linha de uma imagem de uma só vez. Usam uma matriz de plano focal bidimensional (FPA), na qual todos os elementos da imagem são capturados ao mesmo tempo que cada elemento detetor na matriz [1]. A tecnologia de FPA é a mais utilizada em detetores infravermelhos. As câmaras infravermelhas também podem incluir lentes óticas, software de processamento e exibição das imagens para armazenamento interno ou transmitir via USB/Ethernet os dados capturados, por exemplo. A Figura 2.5 mostra os vários constituintes de uma câmara IR.

Os detetores das câmaras IR estão divididas em dois tipos: *Cooled* e *Uncooled*. Os

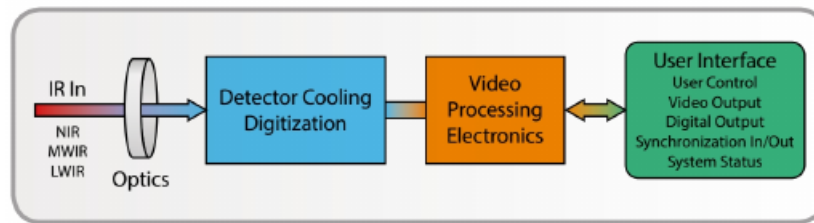


Figura 2.5: Diagrama genérico de uma câmera infravermelha [4].

detetores *Cooled* operam na gama de comprimentos de onda dos 2 até 5.6 μm , que corresponde maioritariamente à banda MWIR. Estes detetores são conhecidos como detetores de fótons ou detetores quânticos, que têm uma junção p-n¹ que lhes permite converter diretamente a radiação IR absorvida em energia elétrica. A temperatura típica de operação deste tipo de detetores é de cerca de 77K (≈ -196.2 °C) [4]. Uma câmara com este tipo de detetores tem alta sensibilidade e pode fornecer centenas de *frames* por segundo, com resolução HD.

As câmaras *Uncooled* são geralmente compostas por detetores térmicos. Os detetores térmicos convertem a radiação IR absorvida em energia térmica causando um aumento na temperatura do detetor. A maioria das câmaras IR deste tipo possuem um detetor com um microbolómetro. FPAs de microbolómetro são sensores térmicos que podem ser criados a partir de materiais metálicos ou semicondutores. A Figura 2.6 mostra a anatomia básica de um pixel típico de um microbolómetro. Os detetores IR não refrigerados operam num comprimento de onda de 8 a 14 μm , na banda LWIR. Estes detetores têm menor sensibilidade e um tempo de resposta mais lento do que os detetores refrigerados, mas em compensação são menores, silenciosos e têm baixo custo.

Os dados de saída de uma câmara IR são tipicamente uma imagem em escala de cinza com uma profundidade de 8 para 16 bits por pixel. As câmaras radiométricas geralmente fornecem dados de saída numa intensidade bruta de 16 bits por valor. Estas câmaras consideram-se calibradas se puderem medir a temperatura através dos dados de saída. Algumas câmaras também tem um modo para visualizar os dados de saída em pseudo-cores, 24 bits por pixel, para que a imagem seja mais perceptível ao olho humano do que a de tons de cinza. As Figuras 2.7b e 2.7c são imagens captadas por uma câmara IR usando pseudo-cores.

¹Os fótons absorvidos alteram a concentração do portador de carga livre na zona de deflexão.

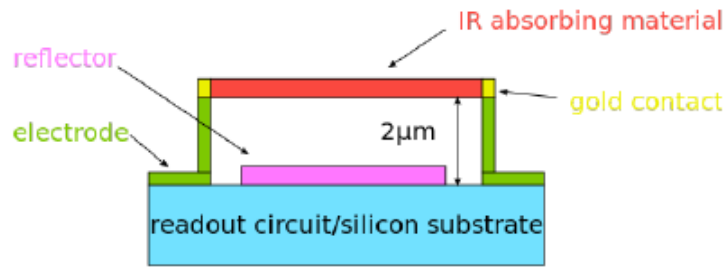
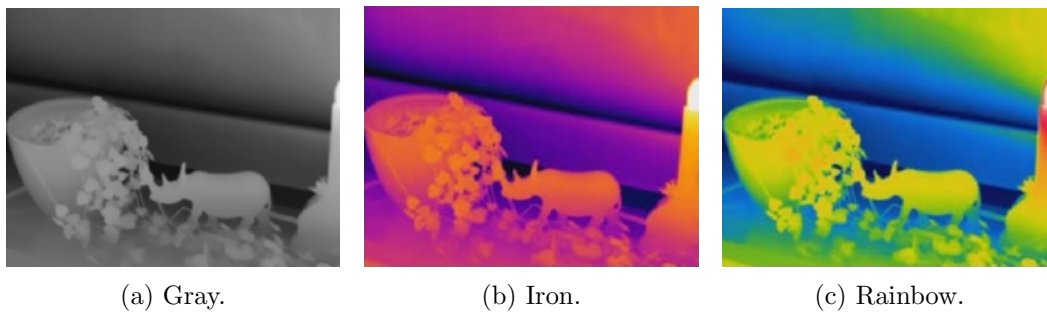


Figura 2.6: Vista transversal de um microbolômetro.



(a) Gray.

(b) Iron.

(c) Rainbow.

Figura 2.7: Imagens térmicas em escala de cinzas, 2.7a, e em pseudo-cores, 2.7b e 2.7c [5].

2.3 Parâmetros que definem a qualidade de uma imagem térmica

As câmaras IR são basicamente um conversor de imagem (convertem radiação infravermelha numa imagem visível) só precisamos de entender melhor alguns atributos para determinar a qualidade de uma imagem térmica. Os parâmetros de avaliação são:

- Resolução;
- Sensibilidade térmica;
- Non-uniformity correction (NUC).

2.3.1 Resolução

Uma das primeiras considerações na hora de escolher uma câmara IR é a resolução. Sendo que as resoluções *standard* produzidas pelos maiores fabricantes deste tipo de

câmaras são:

- Baixa resolução: $\leq 160 \times 120$ (19.600 pixels);
- Media resolução: 320×240 (76.800 pixels);
- Alta resolução: 640×480 (307,200 pixels).

Tendo em conta a lista anterior, conclui-se que quem acaba por determinar a resolução da câmara é o tipo de aplicação e a qualidade de imagem que queremos obter. Na Figura 2.8 consegue-se observar a diferença entre as resoluções mencionadas.

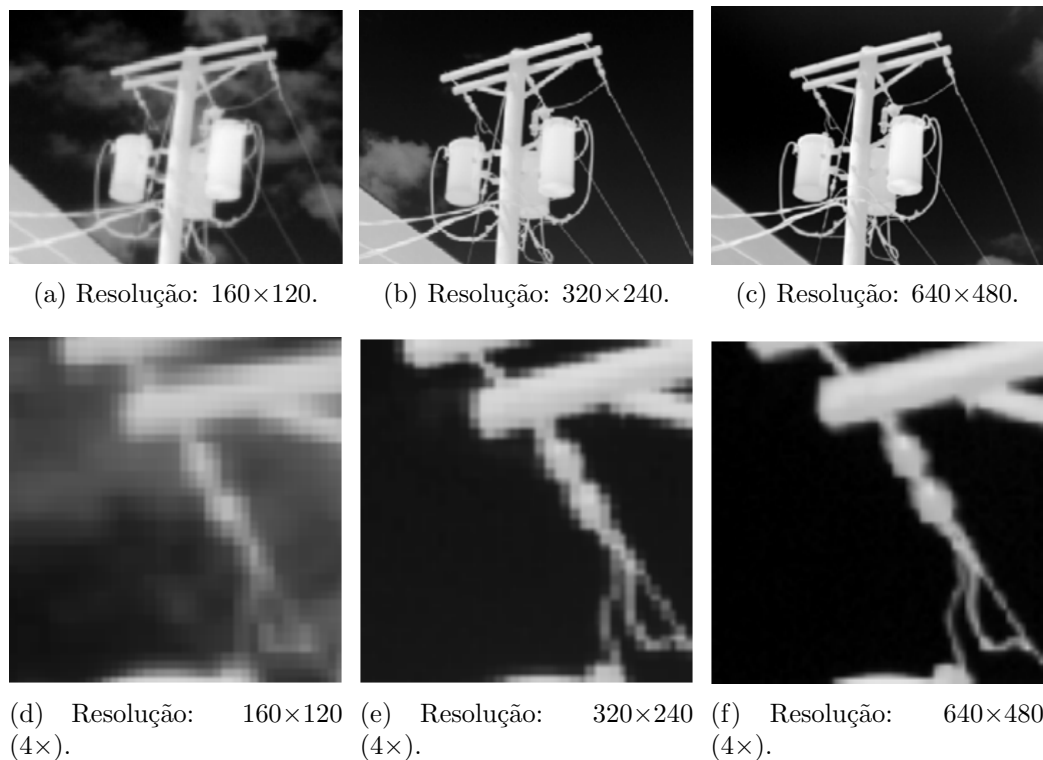


Figura 2.8: Resoluções *standard* dos fabricantes de câmaras IR [6].

2.3.2 Sensibilidade térmica

A sensibilidade térmica refere-se à capacidade de uma câmara IR mostrar uma boa imagem, mesmo que o contraste térmico no meio seja baixo. Por outras palavras, uma câmara com boa sensibilidade térmica consegue distinguir diferentes objetos num meio em que existe pouca diferença de temperatura entre eles.

A sensibilidade é medida por um parâmetro conhecido como Noise Equivalent Temperature Difference (NETD), como por exemplo, NETD @ 30°C: 80 mK. NETD refere-se à quantidade de radiação infravermelha necessária para produzir um sinal de saída igual ao próprio ruído do sistema. Esta classificação de ruído do sistema deve ser o mais baixa possível.

Este tipo de ruído também é conhecido por ruído temporal, porque está relacionado ou limitado pelo tempo. O ruído temporal é a variação dos valores de saída dos pixels, sob radiação uniforme, devido ao ruído do dispositivo ao longo do tempo. Na Figura 2.9 pode observar-se um exemplo de ruído temporal.

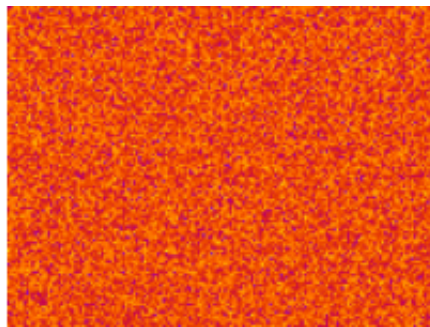


Figura 2.9: Ruído temporal.

O NETD muda com a temperatura que se pretende atingir. Na Figura 2.10 estão duas curvas e cada uma representa um intervalo de temperatura diferente numa câmara IR. Podemos ver que à medida que a temperatura do objeto aumenta, o NETD diminui (melhor sensibilidade). Quanto maior o intervalo de temperatura, maior é o NETD. O valor padrão para as especificações NETD é para uma temperatura em que o objeto está a 30°C.

Em suma, quanto menor for o NETD melhor vai ser a imagem gerada, vamos ter uma melhor eficiência com imagens melhores, a focagem da câmara é melhor e é mais fácil detetar objetos numa imagem IR. Como podemos observar na Figura 2.11.

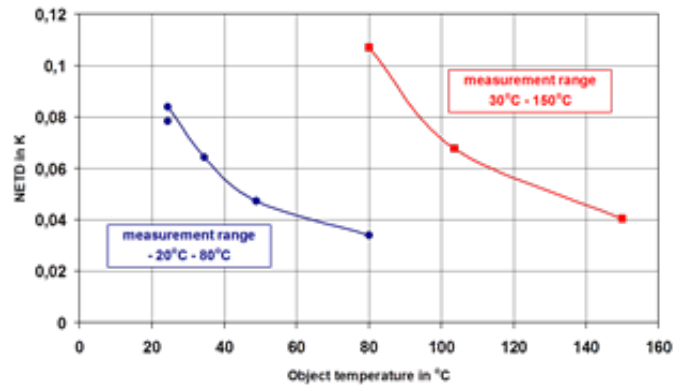
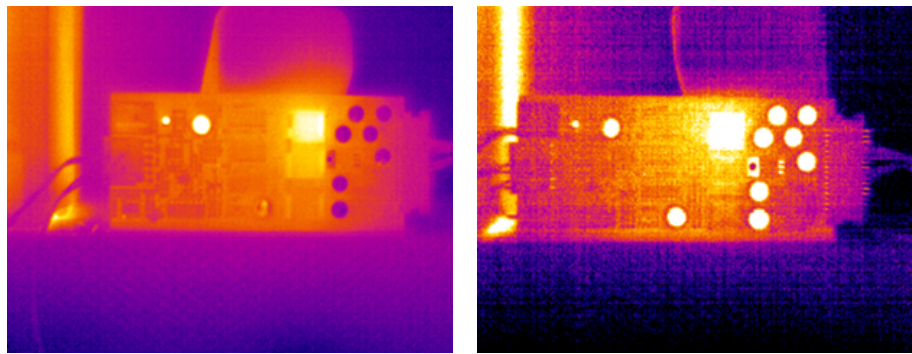


Figura 2.10: Função de temperatura NETD.



(a) NETD 60 mK.

(b) NETD 80 mK.

Figura 2.11: Diferença entre NETD.

2.3.3 NUC

À medida que o número de pixels aumenta e a sensibilidade melhora a qualidade da imagem depende cada vez mais de um processo chamado NUC. Como descrevi anteriormente, FPA de microbolómetros são essencialmente uma matriz de resistências minúsculas e por causa da micro escala desses dispositivos existem variações em como cada pixel responde à energia infravermelha vinda de um objeto [6].

As câmaras IR são calibradas de fábrica para gerar coeficientes de compensação de não uniformidade (NUC) que são aplicadas automaticamente pela câmara em tempo real para manter uma boa qualidade de imagem. Os coeficientes compreendem uma tabela NUC e são tipicamente válidos para um subconjunto específico da faixa de temperatura operacional total. Conseqüentemente, existem várias tabelas NUC para abranger toda a faixa de temperatura de operação, e a câmara seleciona automaticamente a tabela ideal

com base na sua temperatura.

2.4 Soluções comerciais

Atualmente, estão disponíveis no mercado diversas câmaras IR para qualquer tipo de aplicação. Contudo, na maior parte dos casos, apresentam algumas limitações como o preço elevado, peso, tamanho e consumo energético.

2.4.1 Câmaras IR

Em [32] os autores recorrem a uma câmara IR, com uma resolução de 231 x 306 pixels, instalada num UAV de maneira a realizar a inspeção de edifícios e serem capazes de detetar fugas de calor. Este tipo de aplicação, embora não tão indispensável para o Ser Humano, permite aumentar consideravelmente a eficiência energética dos edifícios, diminuindo o consumo energético associado ao aquecimento das casas, e consequentemente levando a um uso mais sustentável da energia.

No artigo [31] os autores demonstraram um algoritmo de controlo para ser utilizado em UAVs para manobras de vigilância de áreas florestais propícias a incêndios, de maneira a serem capazes de detetar alguma situação anómala. De forma a realizarem esta tarefa, recorrem a UAVs, podendo utilizar apenas um único UAV ou um conjunto, todos eles equipados com câmaras IR.

Os autores de [7] utilizaram diferentes algoritmos para conseguirem detetar fogos recorrendo aos dados de uma câmara de espectro visível combinado com uma câmara IR. A fusão de informação retornada por estes dois sensores permitiu desenvolver um algoritmo capaz de detetar um incêndio com maior precisão, diminuindo consideravelmente o número de falsos alarmes causado por um sistema deste tipo. As características da câmara IR usada por estes autores estão representadas na Tabela 2.2.

Tabela 2.2: Características da câmara IR, Raytheon L-3 Thermal-Eye 2000AS, usada em [7]

Raytheon L-3 Thermal-Eye 2000AS	
System type:	FPA
Spectral range:	LWIR
Array format:	160 x 120 pixels
Detector material:	Microbolometer
Measurement accuracy:	-
Measurement range:	-20 to 1500°C
With filter:	-20 to 1500°C
FOV:	12 x 9°
Cooling:	Uncooled
Spatial resolution:	Lens Dependent
Thermal sensitivity:	< 100 mK @ 30°C
Frame rate:	30 Hz
Dynamic range:	8 bit
Operating temperature:	-20°C to 50°C
Focus distance:	≈ 15.24 cm
Video output:	60 Hz

Em [8] os autores apresentam um sistema *stereo* para detecção de pedestres usando câmaras IR. E como a detecção de pedestres através de imagens de câmaras IR pode ser difícil, dependendo das condições ambientais, os autores propuseram três abordagens diferentes para a sua detecção: detecção de pedestres através de uma área quente, detecção baseada nos contornos da área quente e ainda computação DSI (*Disparity Space Image*). O sistema desenvolvido foi implementado num veículo experimental equipado com duas câmaras IR que trabalham na gama espectral dos 7 - 14 μm , tendo sido testado em diferentes meios: rurais e urbanos. As características da câmara IR usada por estes autores estão representadas na Tabela 2.3.

Tabela 2.3: Características da câmara IR, Raytheon L-3 Thermal-Eye ControlIR 300D, usada em [8]

Raytheon L-3 Thermal-Eye ControlIR 300D	
System type:	FPA
Spectral range:	LWIR
Array format:	320 x 240 pixels
Detector material:	BST
Measurement accuracy:	-
Measurement range:	-
With filter:	-
FOV:	Lens dependent
Cooling:	Uncooled
Spatial resolution:	Lens dependent
Thermal sensitivity:	< 100 mK @ 30°C
Frame rate:	60 Hz
Dynamic range:	8 bit
Operating temperature:	-15°C to 45°C
Focus distance:	≈ 5.08 cm
Video output:	60 Hz

Em [9] os autores apresentam um projeto que tem como objetivo a utilização de câmaras IR na deteção de fugas de gás recorrendo a técnicas de processamento de imagem para este tipo de sensor. O sistema de inspeção usa um detetor microbolómetro² não refrigerado, que opera numa ampla gama espectral, e apresenta baixo consumo energético, além de ser pequeno. O princípio de deteção apresentado por estes autores baseia-se no uso de técnicas de processamento de imagem com o uso externo de iluminação IR, aumentando assim o limite da deteção. Isto permite que o sistema proposto pelos autores possa operar, na maioria dos casos, independentemente das condições ambientais, ao contrário dos sensores comerciais passivos. Por ultimo, a plataforma usada por eles usa a técnica de Simultaneous Localization and Mapping (SLAM) o que lhes permite localizar de imediato a fuga de gás no mapa. As características da câmara IR usada por estes autores estão representadas na Tabela 2.4.

²Tipo específico de bolómetro com um detetor para sentir a energia térmica

Tabela 2.4: Características da câmara IR, BIRD-640 SCD Core, usada em [9]

BIRD-640 SCD Core	
Detector:	Uncooled VOx microbolometer
Spectral wide:	3 - 5 μm
Array format:	640 x 480 pixels
Pixel pitch:	25 μm
Thermal sensitivity:	< 50 mK @ 25°C
Communication:	Camera Link
Digital resolution:	14 bits
Frame rate:	60 Hz
Power:	< 5 W

2.4.2 CMOS termográficos

O autor de [10] propõem a implementação de um sistema de processamento de imagem baseado em FPGA que facilitará a deteção de incêndios florestais. Devido às propriedades inerentes dos fogos, a autenticação e classificação de incêndios florestais pode ser desafiadora ao tentar fazer isso com recurso a uma imagem RGB. Então, o autor desta dissertação propõem a utilização de uma câmara IR de baixo custo, que simplificará o processo de deteção. Uma das conclusões a que chegou o autor desta dissertação, é que qualquer incêndio capturado com uma câmara IR terá um padrão distinto, mas é bastante simples de analisar e autenticar. O sistema proposto pelo autor consiste em três módulos principais: *hardware*, captura de imagem e módulo de configuração de alarme. As características da câmara IR usadas por estes autores estão representadas na Tabela 2.5.

Tabela 2.5: Características da câmara IR, FLIR Lepton 2.5, usada em [10]

FLIR Lepton 2.5	
Array format:	80 x 60 pixels
Horizontal Field of View (HFOV):	50°
Shutter:	Yes
Distortion:	< 8 %
Scene dynamic range:	-10°C to +140°C
Pixel pitch:	17 μm
Sensor technology:	Uncooled VOx microbolometer
Spectral range:	LWIR
Effective frame rate:	8.7 Hz
Thermal sensitivity:	< 50 mK @ 30°C
Output format:	User-selectable 14 bit, 8 bit (AGC applied), or 24 bit RGB (AGC and colorization applied)
Temperature compensation:	Automatic. Output image independent of camera temperature
Temperature range:	Shutter operation limited to -10° to +65°

Em [11] o autor deste trabalho pretende desenvolver um algoritmo capaz de contar, detetar e localizar pessoas usando uma câmara IR de baixo custo, FLIR Lepton 3, e uma Orange Pi para fazer o processamento de imagem. Esta dissertação apresenta todo o processo necessário para a configuração do *hardware* e a solução de *software* para resolver o problema de deteção e localização de pessoas. O método proposto pelo autor desta dissertação baseia-se na aplicação de um filtro de temperatura humana, processamento de imagem com deteção de objetos usando OpenCV e reconstrução de cenários 3D com os parâmetros de ambiente conhecidos. Esta abordagem permitiu ao autor obter uma precisão de 90% com o seu *dataset*, que segundo ele, tem várias possibilidades de melhoria. As características da câmara IR usadas por estes autores estão representadas na Tabela 2.6.

Tabela 2.6: Características da câmara IR, FLIR Lepton 3, usada em [11]

FLIR Lepton 3	
Array format:	160 x 120 pixels
HFOV:	57°
Shutter:	Yes
Distortion:	< 13 %
Scene dynamic range:	-10°C to +140°C
Pixel pitch:	12 μm
Sensor technology:	Uncooled VOx microbolometer
Spectral range:	LWIR
Effective frame rate:	8.7 Hz
Thermal sensitivity:	< 50 mK @ 30°C
Output format:	User-selectable 14 bit, 8 bit (AGC applied), or 24 bit RGB (AGC and colorization applied)
Temperature compensation:	Automatic
Temperature range:	Shutter operation limited to -10° to +65°

2.4.3 Comparação das características das câmaras e CMOS termográficos apresentadas em 2.4.1 e 2.4.2

Tendo conta as principais características a ter em conta numa câmara IR, mencionadas anteriormente, foi elaborada a tabela 2.7.

Tabela 2.7: Tabela com as principais características das câmaras IR apresentadas no capítulo 2.4

	Array format	Thermal sensitivity	Frame Rate	FOV/HFOV
Raytheon L-3 Thermal-Eye 2000AS:	160 x 120 pixels	< 100 mK	30 Hz	FOV: 12 x 9°
Raytheon L-3 Thermal-Eye ControlIR 300D:	320 x 240 pixels	< 100 mK	60 Hz	FOV: Lens dependent
BIRD-640 SCD Core:	640 x 480 pixels	< 50 mK	60 Hz	FOV: Lens dependent
Flir Lepton 2.5:	80 x 60 pixels	< 50 mK	8.7 Hz	HFOV: 50°
Flir Lepton 3:	160 x 120 pixels	< 50 mK	8.7 Hz	HFOV: 57°

Começando pela resolução de imagem das câmaras referidas na Tabela 2.7, podemos verificar que aquela que tem uma resolução menor é a Lepton 2.5, mas no tipo de aplicação para o qual os autores do artigo [10] a usaram conseguir obter bons resultados com ela. Este parâmetro, resolução, é dependente da aplicação para o qual se pretende usar a câmara. Temos que ter em conta que se pretendemos ter uma imagem com bons detalhes quando fazemos *zoom*, por exemplo, temos de ter uma maior resolução. No caso

do artigo [10] o autor pretende utilizar a câmara para deteção de incêndios florestais, por isso, mesmo com uma baixa resolução conseguiu detetar os *clusters* quentes na imagem.

Quanto à sensibilidade térmica, as que apresentam melhor sensibilidade são: BIRD-640 SCD Core, Lepton 2.5 e Lepton 3. Porque quanto menor for este valor melhor vai ser a imagem gerada.

Passando agora a analisar o *frame rate*, as que apresentam um valor mais baixo são: Lepton 2.5 e a Lepton 3. Uma vez que o *frame rate* destas câmaras é fixo, para algum tipo de aplicações pode não ser viável usar estas câmaras, como por exemplo, se pretendermos fazer vídeo a uma alta taxa de transmissão. Em contra partida, estes sensores, normalmente, são mais baratos que os outros referidos nesta mesma tabela. Mais uma vez, este parâmetro, depende da aplicação para a qual vamos usar a câmara.

Quanto ao último parâmetro, dependem sempre do tipo de lente acoplado ao sensor IR.

2.5 Resumo do capítulo

Com o desenvolvimento deste capítulo foi possível entender melhor todos os conceitos inerentes à radiação térmica e o tipo de tecnologias usadas nas câmaras IR, sendo que a mais adequada a este projeto é, claramente, as câmaras IR que operam na banda LWIR.

Consequentemente, foi necessário efetuar um estudo sobre os trabalhos que foram desenvolvidos na área usando este tipo de câmaras. Nesta fase, o objetivo era procurar, dentro do tipo de aplicações já referidas anteriormente, as características da câmara IR e as suas aplicações, de forma a entender melhor quais as características do sensor usado nessas mesmas câmaras que melhor se ajustam aos objetivos desta dissertação. Este estudo permitiu descobrir que, para a maior parte das aplicações atuais iria ser benéfico o uso de um sistema mais leve e pequeno, com menor consumo energético e um baixo preço de produção. Além disso, existem ainda outras questões que podem ser prejudiciais em certas aplicações, tais como, a baixa sensibilidade térmica de algumas das câmaras IR usadas em alguns dos trabalhos analisados.

Esta página foi intencionalmente deixada em branco.

Capítulo 3

Fundamentos Teóricos

Neste capítulo são apresentados alguns conceitos e fundamentos necessários para a compreensão do tema abordado na presente dissertação.

3.1 Fatores que influenciam as medições radiométricas de temperatura

As câmaras térmicas são um recurso poderoso porque para além de serem capazes de ver claramente na escuridão total, sem qualquer iluminação adicional, permitem detetar e mostrar as diferenças mínimas de temperatura dos objetos dependendo do FOV da câmara.

Essas diferenças de temperatura podem ser usadas para mostrar as variações de temperatura relativa, por exemplo, que um conjunto de objetos é mais quente ou mais frio do que os objetos ao seu redor, ou permitir obter medições de temperatura precisas e sem a necessidade de contacto. Uma câmara térmica pode até permitir fazer ambas as coisas ao mesmo tempo e acompanhar as tendências de temperatura ao longo do tempo.

Tendo em conta que pretendemos criar uma solução que possa reunir medições de temperatura precisas, há uma série de fatores que devemos ter em conta e que podem afetar muito a precisão dessas medições.

3.1.1 Radiometria e características da superfície

Um sensor IR com radiometria permite medir a temperatura de uma superfície interpretando a intensidade de um sinal infravermelho que chega ao sensor a partir dessa superfície. Esta técnica é conhecida como: Non-destructive technique (NTD), e oferece

enormes vantagens aos utilizadores para muitas das aplicações de medição de temperatura na superfície, pois fornece medições de temperatura que garantem simultaneamente a segurança do operador da câmara e isolam o objeto no qual queremos saber a temperatura, da influência externa de medição do equipamento. No entanto, a capacidade de detetar a temperatura remotamente, em oposição à medição via contacto direto com a superfície, requer que o utilizador leve em consideração as condições ambientais e da superfície. Algumas dessas condições estão ilustradas na Figura 3.1.

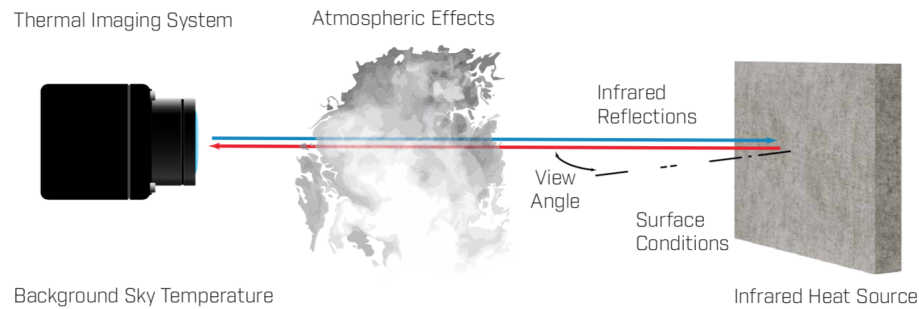


Figura 3.1: Ilustração da influência que a atmosfera e a superfície podem ter na medição de temperatura.

A medição de temperatura numa superfície depende da capacidade de compensar com precisão as características da superfície, a interferência atmosférica e o sistema de imagem. As características da superfície que influenciam a medição da temperatura são a emissividade da superfície e a refletividade nos comprimentos de onda da radiação infravermelha. A atmosfera vai sempre absorver e emitir energia térmica com base na sua temperatura, humidade, composição e a distância entre a câmara e a superfície.

A obtenção de medições de temperatura mais precisas numa imagem térmica é influenciada pelo foco da imagem, desfoque e resolução do pixel. Cada um desses fatores influencia a precisão da medição e é dependente da aplicação no qual a câmara será inserida.

3.1.2 Emissividade

Emissividade de um material, propriedade representada pela letra ε , é a medição da eficiência de uma superfície em emitir energia térmica em relação a um emissor perfeito, chamado de “corpo negro”. Possui capacidade de emitir energia eletromagnética todos os corpos que possuem uma temperatura superior a zero Kelvin. Essa taxa de emissão é calculada através da razão entre a energia irradiada por um determinado material e

a energia irradiada por um corpo negro para o mesmo comprimento de onda ($\varepsilon=1$). Qualquer objeto que não seja um verdadeiro corpo negro tem emissividade menor que 1 e superior a zero.

$$0 < \varepsilon \leq 1 \tag{3.1}$$

Quanto maior o valor de ε , mais próxima a emissividade do material é da do corpo negro, ou seja, maior a sua capacidade de emissão de energia. A emissividade de um material está relacionada com a sua superfície e com o seu acabamento, variando de acordo com a temperatura em que o objeto se encontra e com o comprimento de onda da radiação emitida. Materiais orgânicos como a pele humana, solo, madeira não pintada ou envernizada e rochas são, tipicamente, altamente emissivos. Os materiais brilhantes ou polidos, por outro lado, são mais reflexivos. Uma medição de temperatura que não leve em conta a emissividade real da superfície poderá levar a que pareça “mais fria ” do que realmente é.

Para aplicações agrícolas, muitos materiais orgânicos e materiais com superfícies muito rugosas têm valores de emissividade próximos de $\varepsilon=1$. Para outras aplicações, incluindo inspeções de linhas elétricas e painéis solares, a superfície pode ser um vidro ou metal altamente polido, sendo que ambos podem ter valores de emissividade muito mais baixos. Como referência, a Tabela 3.1 demonstra a ampla faixa de valores de emissividade que podem ser encontrados neste tipo de aplicações.

Todas as imagens térmicas incluem materiais com diferentes níveis de emissividade e refletividade, como por exemplo, a Figura 3.2. Perceber estas propriedades é vital para ter medidas de temperatura mais precisas.

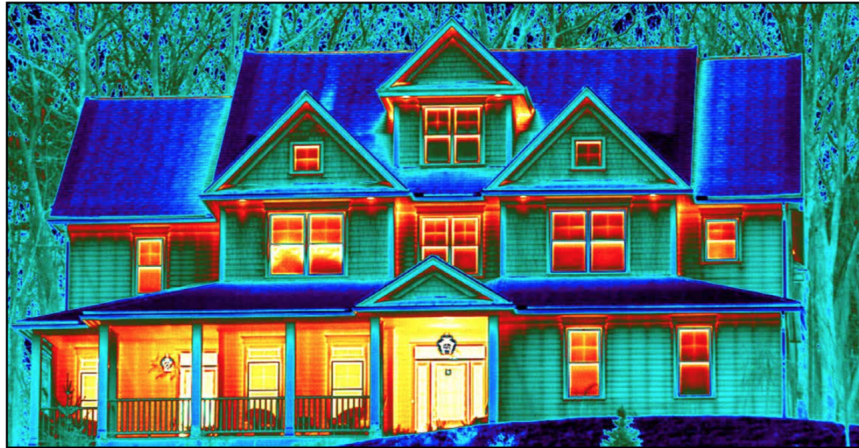


Figura 3.2: Imagem térmica de uma casa com diferentes tipos de materiais de construção.

3.1.3 Refletividade

A refletividade é a quantidade de luz refletida pela superfície dos materiais. E tal como a emissividade, a refletividade de uma superfície é dependente da morfologia e da rugosidade da superfície. Uma vez que a refletividade (R) está relacionada com a emissividade (ε) por: $R = 1 - \varepsilon$.

Uma câmara térmica quando está próxima de uma superfície irá detetar a radiação refletida por essa mesma superfície e a radiação emitida pelo fundo (meio ambiente). Logo, fazer medições de temperatura de uma superfície altamente refletiva será muito difícil, porque a imagem é influenciada pelos reflexos térmicos do fundo. Ao fazer medições externas, por exemplo, num telhado de metal que esteja limpo e sem pintura pode parecer mais frio do que realmente é, porque o telhado brilhante irá refletir o céu acima dele.

Nestas circunstâncias é aconselhável obter uma sequência de imagens da superfície de diferentes ângulos para reduzir a influência de qualquer brilho solar. No entanto, deve-se ter cuidado para não fazer medições em ângulos excessivamente oblíquos, pois os reflexos podem mudar e tornarem-se um fator mais importante à medida que os ângulos de visão aumentam. Alternativamente, medidas muito próximas da superfície e medições diretas podem resultar na visualização do reflexo da própria câmara e resultar em medições imprecisas. A Figura 3.3 ilustra os desafios do ângulo de visão para medições radiométricas de temperatura e recomenda realizar as medições num ângulo menor que 60° à superfície normal.

Tabela 3.1: Tabela de emissividade de alguns materiais mais comuns

Material	Emissividade (ϵ)
Aço inoxidável - típico, polido	0,07
Alumínio - altamente polido, película	0,04
Água	0,96
Areia	0,90
Cimento	0,88 - 0,93
Janela de vidro	0,90 - 0,95
Materiais de construção: Placas de amianto	0,93 - 0,96
Materiais de construção: Tijolo	0,93 - 0,96
Materiais de construção: Placa de gesso	0,90 - 0,92
Materiais de construção: Madeira	0,82 - 0,92
Papel, branco	0,92 - 0,97
Pavimentação de alcatrão	0,85 - 0,93
Rochas	0,88 - 0,95
Solo	0,93 - 0,96
Tecido	0,75 - 0,90
Tintas - pretas	0,98
Tintas - branca acrílica	0,90
Tintas - branca óxido de zinco	0,92
Vegetação	0,92 - 0,96
Cobre polido	0,01
Vidro	0,92
Ferro polido	0,23
Tinta a óleo	0,94

3.1.4 Efeito da atmosfera

A atmosfera terrestre interfere na imagem térmica absorvendo e emitindo radiação infravermelha com base na densidade, temperatura e humidade relativa (RH) do ar. Por isso, dependendo da distância entre a câmara e a superfície a medir, as condições atmosféricas também podem alterar as medições radiométricas de temperatura. Não levar em consideração estes fatores irá resultar em medições radiométricas erradas, ou seja, a superfície parecerá mais fria do que está.

Vamos considerar o seguinte exemplo: Dia muito quente e húmido, e uma distância de 100 metros entre a câmara e a superfície (35°C de temperatura do ar e 80% Relative Humidity (RH)) terá uma taxa de transmissão teórica de 80%. Isso significa que apenas 80% do calor térmico emitido pela superfície chegará à câmara. Se essa perda de transmissão atmosférica não for considerada, e se a câmara estiver a olhar para um ob-

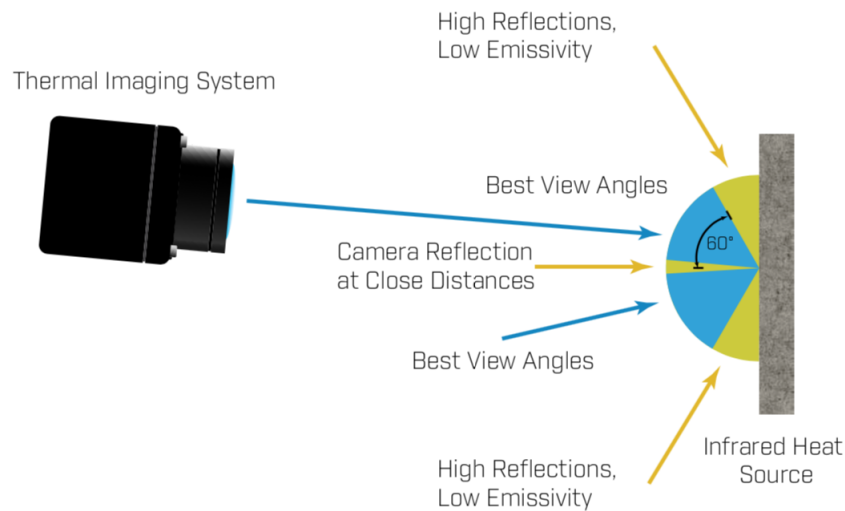


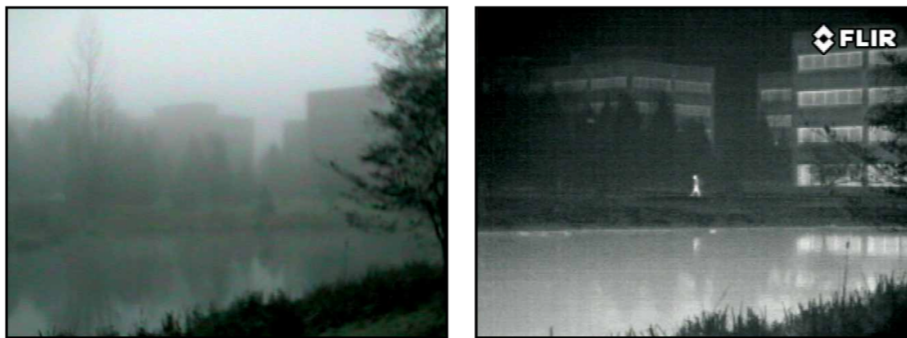
Figura 3.3: As medições radiométricas de temperatura devem evitar medições diretas para reduzir a reflexão direta da câmara e evitar ângulos oblíquos de modo a reduzir a reflexão geral.

jeto de 50°C com uma emissividade conhecida de 0,97 irá ler $47,6^{\circ}\text{C}$ - temos assim um erro de $2,4^{\circ}\text{C}$ causado apenas pela atmosfera. A melhor maneira de atenuar o efeito da transmissão atmosférica é minimizar a distância entre a câmara e a superfície.

As medições radiométricas deveriam de ser sempre realizadas na ausência de chuva, neve, fumos, poeiras, pois estes efeitos irão reduzir a transmissão atmosférica e alterar a temperatura da superfície e do fundo, ver Figura 3.4. Sabendo que as medições radiométricas indicam apenas a temperatura da superfície, estas podem ser muito influenciadas por ventos fortes.

3.1.5 Resolução

Quando temos uma imagem térmica com informação radiométrica sobre uma superfície esta fornece uma medição de temperatura radiométrica para cada pixel da imagem. Se tivermos uma superfície muito pequena na imagem no qual queiramos saber a sua temperatura, irá ser extremamente difícil de medi-la com precisão, pois o número de pixels que descrevem as dimensões da superfície é reduzido. O efeito *spot-size* é esta degradação na precisão da medição devido aos efeitos de distorção ótica, difração, luz dispersa e processamento de imagem do sensor que resulta numa imagem desfocada. Não levar em consideração o efeito *spot-size* resultará em medições que podem ser in-



(a) Imagem capturada por uma câmara de espectro visível. (b) Imagem capturada por uma câmara termográfica.

Figura 3.4: A humidade atmosférica, como o nevoeiro, podem reduzir muito o alcance da deteção de uma câmara termográfica. De notar que, na Figura 3.4b, podemos observar os reflexos térmicos da pessoa e do edifício na superfície da água, efeito já referido no capítulo 3.1.3.

fluenciadas por superfícies próximas. Embora o efeito *spot-size* possa ser dependente da câmara térmica que se está a usar, medições de laboratório da FLIR, sugerem que um ponto de medição na imagem térmica deve ter pelo menos 10 pixels de diâmetro para termos uma medição precisa e um diâmetro de 20 pixels já será o suficiente para anular o efeito *spot-size*. A Figura 3.5 ilustra a melhoria que se obtém na precisão radiométrica da temperatura conforme aumentamos o diâmetro de pixels a ser utilizados na medição.

O efeito *spot-size* torna-se cada vez mais relevante à medida que a distância entre a superfície e a câmara aumenta e o número de pixels que representa a superfície é reduzido. O número de pixels que deve ser usado para calcular a temperatura radiométrica de uma superfície de um objeto depende da distância do pixel, do comprimento focal, da distância da câmara à superfície e do menor tamanho característico (comprimento, diâmetro) da superfície. A Figura 3.6 ilustra esses fatores. O número de pixels (N) usados para determinar a temperatura radiométrica de um objeto é avaliado pela relação entre o ângulo α e o FOV instantâneo do pixel:

$$N = \frac{\alpha}{IFOV_p} \quad (3.2)$$

onde, o ângulo da superfície para a câmara, $\alpha = d/s$, é a razão da distância entre a superfície da câmara e do objeto (d) e o tamanho do objeto (s). O FOV instantâneo de cada pixel ($IFOV_p$) da câmara é calculado tendo em conta a razão entre a densidade do pixel (p) e o comprimento focal (f), $IFOV_p = p/f$. Estas relações podem ser manipula-

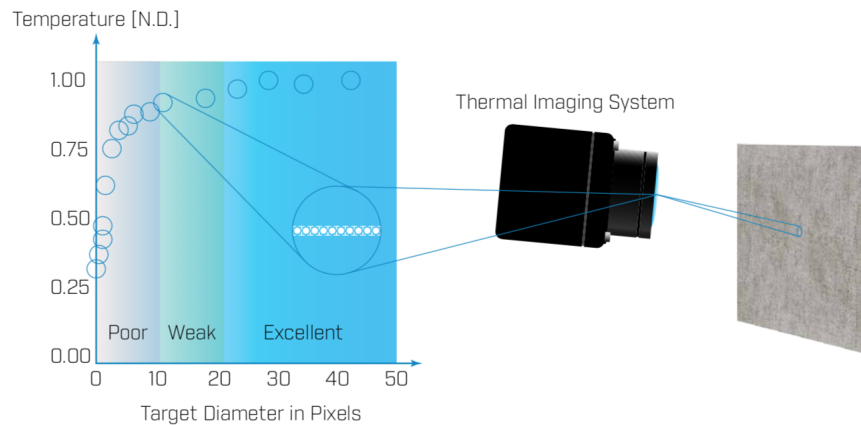


Figura 3.5: O efeito *spot-size*, causado pelas características óticas e físicas da câmara, é mais relevante quando se pretende fazer medições radiométricas de temperatura remotamente.

das para encontrar a distância de medição máxima recomendada, o menor tamanho de objeto necessário e as características da câmara para qualquer aplicação de medição de temperatura radiométrica.

Além disso, as imagens térmicas que estão desfocadas devido ao, por exemplo, o movimento do alvo, também podem fazer com que se tenha de aumentar o número de pixels necessários para fazer medições radiométricas precisas. A montagem da câmara e o uso de técnicas de estabilização ativa puderam ser usadas para reduzir o *jitter* da câmara para maximizar a sua estabilidade e o foco da imagem.

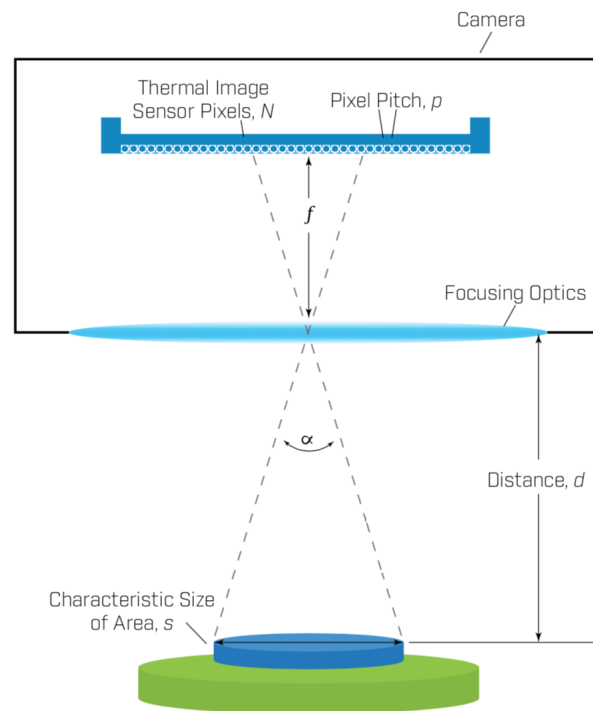


Figura 3.6: O número de pixels usados para determinar a área da superfície de um objeto depende da densidade do pixel (p), comprimento focal (f), distância da câmera à superfície (d) e o menor tamanho característico (s) (comprimento, diâmetro) da área da superfície.

3.2 Calibração

A principal função de uma câmera térmica é detetar radiação IR e converte-la num sinal elétrico, que posteriormente será interpretado pelo sensor e convertido numa imagem térmica, onde será possível calcular as temperaturas das mais diversas superfícies. As medições de temperatura com este tipo de câmaras podem ser muito precisas, permitindo não só monitorizar o desempenho térmico, mas também identificar e avaliar a gravidade de problemas relacionados com calor. Por isso, para que isto se verifique, a calibração da câmara torna-se um processo muito importante para se ter medições de temperatura precisas.

Um dos processos mais comuns de calibração de uma câmara térmica começa com o método de calibração de um único ponto. Este método produz uma progressão linear de entrada-saída conhecendo apenas um ponto de referência. Mas, neste método, a curva de calibração não é fiável e através de diferentes medidas descobriu-se que a diferença entre

a temperatura real e a temperatura medida tinha um erro enorme comparativamente com as correspondentes temperaturas previstas pela linha de calibração.

Existe também o processo de calibração de dois pontos. Mas foram encontrados os mesmos problemas do método anterior. Usar apenas dois pontos de referência para prever a faixa completa de temperaturas não é uma boa solução. Isto porque o número de amostras é muito pequeno.

Para tentar ultrapassar as debilidades dos dois métodos apresentados anteriormente, vamos analisar dois métodos de calibração radiométrica.

3.2.1 Método de calibração radiométrica proposto pela FLIR

Em [36] é descrito um subconjunto simplificado de parâmetros que podem ser alterados, depois da Lepton com configurações de radiometria, estar integrada no sistema final.

A Lepton é calibrada de fábrica para ter medições radiométricas precisas de uma superfície com 100% de emissividade nas proximidades da câmara. Fatores como a emissividade da superfície, radiações indesejados de outras fontes além da superfície irão influenciar a precisão da medição.

Neste documento a FLIR explica todos os passos necessários para compensar algum dos parâmetros configuráveis da câmara e poder ter medições radiométricas mais precisas.

3.2.2 Método de calibração radiométrica Low-Cost

O método de calibração proposto pela autora desta dissertação [37] é baseado num método em que a água é usada como fonte de radiação. Segundo a autora este método é preciso, prático e de baixo custo para a calibração de temperatura de câmaras termográficas. A água é uma fonte de calibração particularmente útil, pois está facilmente disponível e as suas propriedades óticas estão bem documentadas. É considerada uma fonte de calibração ideal, porque não absorve uma radiação significativa e fornece uma emissividade alta ($\varepsilon \approx 0,98$). O grande benefício deste método em comparação a outros procedimentos de calibração típicos é que, os corpos negros comerciais que são muito caros são substituídos por água sem sacrificar a qualidade da calibração. Além disso, com este método a autora conseguiu provar que esta é uma alternativa mais económica aos corpos negros.

3.3 Resumo do capítulo

Em resumo, existem muitos fatores que podem influenciar a precisão das medições radiométricas da temperatura de uma superfície. Para superfícies com baixa emissividade e alta reflexão, os ângulos de visão retos e oblíquos devem ser evitados para reduzir o impacto dos reflexos e da reflexão oblíqua. A emissividade da superfície deve ser alta para reduzir o impacto da reflexão da temperatura de fundo e reflexos do sol, idealmente maior que 0,90.

Os fatores de transmissão atmosférica podem ser reduzidos fazendo medições entre 10 metros ou menos da superfície de alvo e num ambiente fresco e claro. As condições anteriores atenuam o impacto da temperatura do ar, da humidade relativa e partículas do ar. Para distâncias maiores, as condições atmosféricas (distância, humidade, temperatura) precisam de ser bem caracterizadas para se poder calcular e perceber os efeitos da transmissão atmosférica. Medições maiores que 10 metros são ainda mais afetadas pelo efeito de tamanho do ponto quando o número de pixels que descreve qualquer superfície diminui, ou seja, a capacidade de fazer medições a objetos muito pequenos será severamente afetada. Embora seja importante fazer medições com um diâmetro de *spot-size* de pelo menos 10 pixels, é necessário utilizar mais pixels para imagens desfocadas.

Em relação à calibração do sensor foram identificados dois diferentes métodos que poderão ser utilizados de maneira a se poder obter leituras de temperatura mais precisas.

Esta página foi intencionalmente deixada em branco.

Capítulo 4

Arquitectura geral do sistema

Considerando as abordagens descritas no Capítulo 2.4 podemos concluir que estas tem algumas lacunas, tais como:

- Preço: De maneira a ser possível construir um sistema semelhante aos anteriores seria preciso um investimento considerável, o que pode não ser viável se for necessário construir múltiplos sistemas. Além disso, um preço elevado pode impedir a existência de sistemas extra para fácil substituição do sistema em caso de falha. Por exemplo, no caso de missões de detecção e prevenção de incêndios, devido ao tamanho da área a analisar, torna-se necessário que existam diversos veículos a operar em simultâneo, o que se torna mais fácil de realizar caso o preço do sistema seja baixo;
- Tamanho e peso: Para que não haja impedimentos na integração do sistema nos múltiplos veículos autónomos existentes, considerando que estes normalmente tem pouco espaço disponível para o *payload*, torna-se imperativo a diminuição do tamanho e do peso do sistema. Isto permite que o sistema seja versátil e que possa rapidamente ser aplicado em diferentes veículos. Isto permite, por exemplo, que o sistema seja usado em veículos aéreos de asa rotativa de baixo tamanho;
- Consumo energético: Devido às características dos veículos, o consumo energético disponível para o *payload* pode ser consideravelmente baixo. Assim sendo, torna-se necessário criar sistemas com baixo consumo energético, de maneira a maximizar o tempo de operação.

Analisando as lacunas descritas anteriormente torna-se evidente que era necessário pensar numa solução que fosse uma clara mais valia em relação as atuais soluções existentes no mercado. Depois de analisar várias soluções já existentes e tendo sempre em vista

a construção de um sistema de baixo custo, leve, pequeno e de baixo consumo energético optou-se pela seguinte câmara IR da FLIR, Lepton 3.5. Cujas suas características estão representadas na tabela 4.1.

Tabela 4.1: Características do sensor CMOS, FLIR Lepton 3.5

FLIR Lepton 3.5	
Array format:	160 x 120 pixels
HFOV:	57°
Shutter:	Yes
Thermal radiometry:	Yes
Distortion:	< 13 %
Scene dynamic range:	-10°C to +140°C
Pixel pitch:	12 μm
Sensor technology:	Uncooled VOx microbolometer
Spectral range:	LWIR
Effective frame rate:	8.7 Hz
Thermal sensitivity:	< 50 mK @ 30°C
Output format:	User-selectable 14 bit, 8 bit (AGC applied), or 24 bit RGB (AGC and colorization applied)
Temperature compensation:	Automatic
Temperature range:	Shutter operation limited to -10° to +65°

O CMOS demonstrado na Figura 4.1, fabricado pela FLIR, um dos maiores fabricantes de câmaras e CMOS termográficos, tem um preço de aproximadamente 163 €, sendo as suas principais características apresentadas na tabela 4.1. As características deste sensor são iguais à do sensor apresentado na tabela 2.6, com a exceção de que com este, Lepton 3.5, conseguimos fazer medições de radiometria. Este valor apenas inclui o sensor, contudo, apesar de ser necessário desenvolver o restante *hardware* para adquirir imagens da câmara, o produto final além de poder ser adaptado para cada aplicação, terá ainda um custo de produção bastante inferior quando comparado com as câmaras usadas em 2.4.

Este CMOS requer uma alimentação de 5V, tendo consumos à volta dos 140 mW. Outro dos fatores que indica que este sensor tem um grande potencial é o seu peso e dimensões. Pesa cerca de 90 gramas e tem 12.70 mm de comprimento, 10.50 mm de largura e 7.14 mm de altura. O seu peso e tamanho foram um dos fatores determinantes para a escolha desta câmara porque, como já foi referido anteriormente, isto permite que o sistema seja versátil e que possa rapidamente ser aplicado em diferentes veículos. Outra característica não menos importante é a resolução, que no caso desta câmara é de

160 x 120, o que quando comparado com as anteriormente apresentadas e com a oferta disponível no mercado tem uma boa resolução. A gama espectral desta câmara, 8 μm to 14 μm , também se ajusta perfeitamente à mais variada gama de aplicações em que estas câmaras são utilizadas. Além disso, permito-nos fazer medições de temperatura, o que também é muito importante no nosso sistema.



Figura 4.1: Lepton 3.5.

Depois de definidos os requisitos, e da câmara seleccionada, foi necessário definir a arquitetura geral do sistema que se pretende criar e onde se pretende que seja inovador, sendo apresentado na Figura 4.2.

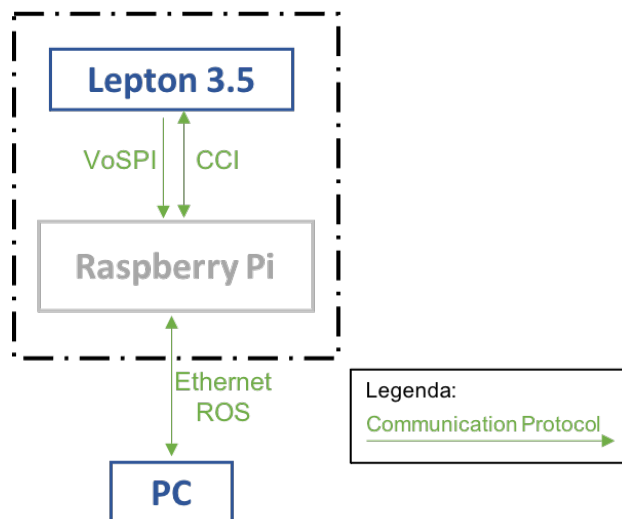


Figura 4.2: Arquitetura geral do sistema.

O tracejado preto da Figura 4.2 identifica a solução que se pretende construir, sendo

possível encontrar dois módulos distintos: Lepton 3.5 e *Raspberry Pi*. O primeiro representa o CMOS escolhido, que já foi descrita anteriormente, enquanto que o segundo identifica o microprocessador selecionado de maneira a que seja possível integrar os protocolos de comunicação necessários:

- Command and Control Interface (CCI): Este protocolo de comunicação é semelhante ao *I²C standard*, de 8 bits. Contudo os registos da Lepton são todos de 16 bits e conseqüentemente, o fabricante teve que adotar outro protocolo que permitisse a transferência de 16 bits. Este protocolo serve para enviar parâmetros de controlo para o sensor, tais como, *Reset*, *Power On*, *Power Off*, *Part Number*, etc;
- Video over SPI (VoSPI): Este protocolo permite uma transferência de vídeo eficiente e verificável através de um canal SPI. O protocolo é baseado em pacotes, sem sinais de temporização incorporados e sem necessidade de controlo de fluxo. O *master* inicia todas as transações e controla a velocidade do *Clock*, sendo que os dados podem ser extraídos da Lepton (*Slave*) a uma taxa flexível. Quando os dados de uma determinada *frame* são lidos, o *master* tem a opção de parar o *Clock* e/ou desativar a linha de *Chip Select* até a próxima *frame* estar disponível. Alternativamente, o *master* pode simplesmente deixar o *Clock* e o *Chip Select* ativos, e neste caso o sensor transmite pacotes de dados inválidos até que os próximos dados de vídeo válidos estejam disponíveis;
- Ethernet: É a arquitetura de interligação de redes locais mais usada;
- Robot Operating System (ROS): Possui um conjunto de ferramentas, bibliotecas e convenções que simplificam e unificam muitas das operações frequentemente utilizadas por robôs. Veio melhorar a eficiência de desenvolvimento de sistemas robóticos, a nível global, criando padrões universais. Como é um software open-source, qualquer pessoa ou entidade pode contribuir para o crescimento do mesmo, além de ser de uso totalmente gratuito.

Tendo em conta os protocolos referidos anteriormente, o microprocessador escolhido deveria de ter, no mínimo, um periférico SPI capaz de comunicar com o sensor a uma frequência de cerca 20 MHz, um periférico *I²C* e um periférico de *Ethernet*. Assim sendo, a escolha recaiu na *Raspberry Pi 4*, pois tem todos os requisitos mínimos necessários para a interligação com o sensor CMOS e um PC externo, além de ser um microprocessador bastante conhecido e fiável.

Capítulo 5

Implementação

Neste capítulo pretende-se descrever todas as partes de *hardware* utilizada no projeto, que são: *hardware* de alimentação e comunicação da Lepton 3.5 com a *Raspberry Pi 4*, caixa desenvolvida para a *Raspberry Pi 4*, modo de funcionamento do sensor, descrição do driver de aquisição das imagens e como é feita a medição de temperatura através da aplicação desenvolvida.

5.1 Hardware

5.1.1 Lepton 3.5

O sensor CMOS escolhido requer que seja desenvolvido hardware que permita a sua alimentação e comunicação com o microprocessador.

Como se pode observar na Figura 5.1, o sensor requer 3 tipos de alimentações:

- Pino 7 (VDDC): Requer uma tensão típica de 1.2 V. Sendo este o pino responsável pela alimentação interna do Lepton ASIC;
- Pino 16 (VDDIO): Requer uma tensão típica de 2.8 V. Sendo este o pino responsável pela alimentação interna do *System I/O*;
- Pino 19 (VDD): Requer uma tensão típica de 2.8 V. Sendo este o pino responsável pela alimentação do sensor;
- Os valores de tensão típica dos pinos 16 e 19 são iguais, mas a FLIR recomenda a utilização de duas fontes de alimentação separadas em vez de uma fonte comum para VDDIO e VDD devido a algumas considerações de ruído que possam existir no circuito.

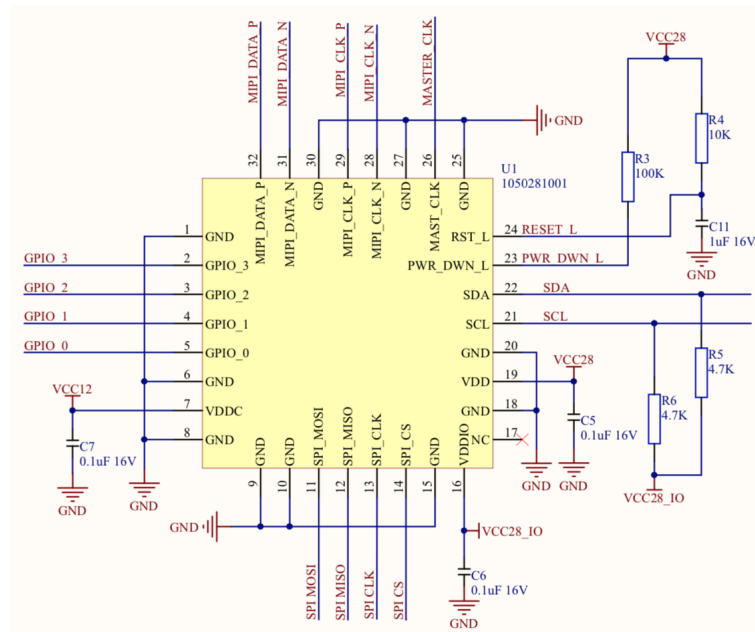


Figura 5.1: *Pinout* Lepton 3.5.

A Figura 5.2 demonstra os 3 reguladores de tensão utilizados.

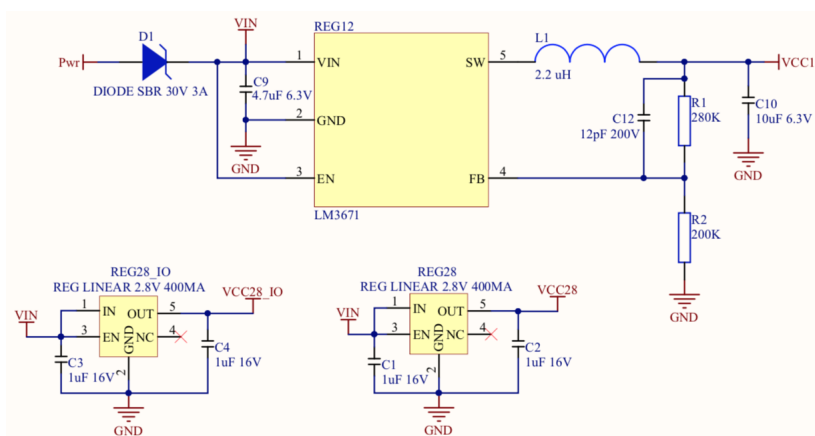


Figura 5.2: Reguladores de tensão de alimentação da Lepton 3.5.

Outro pormenor a ter em conta é que este sensor precisa de um *clock* interno de 25 MHz, identificado na Figura 5.1 como: *MASTER_CLK*, Pino 26. A Figura 5.3 demonstra as ligações necessários para o funcionamento do *clock* interno.

Por último, decidimos disponibilizar os pinos de comunicação (CCI e VoSPI), ali-

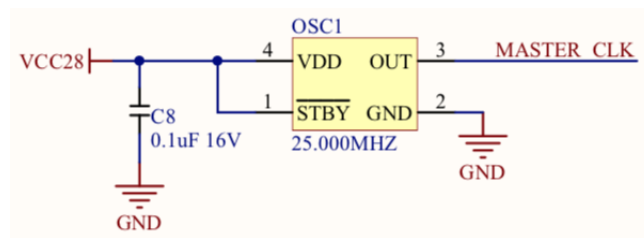


Figura 5.3: *Clock* interno Lepton 3.5.

mentação para o sensor e pino de sincronismo (*GPIO_3*) em dois conectores (J1 e J2) de oito pinos cada, porque assim temos mais estabilidade na PCB quando encaixada na PCB principal. A Figura 5.4 demonstra a divisão dos sinais mencionados anteriormente.

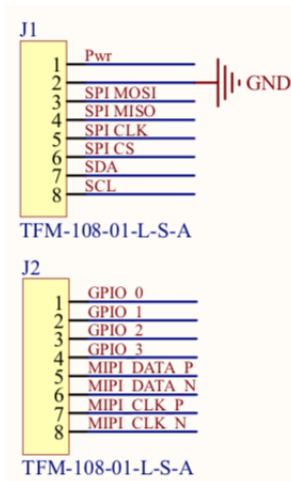
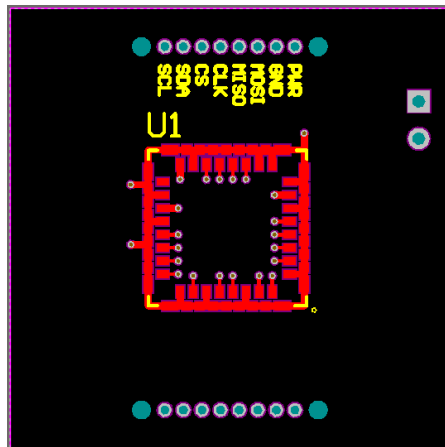
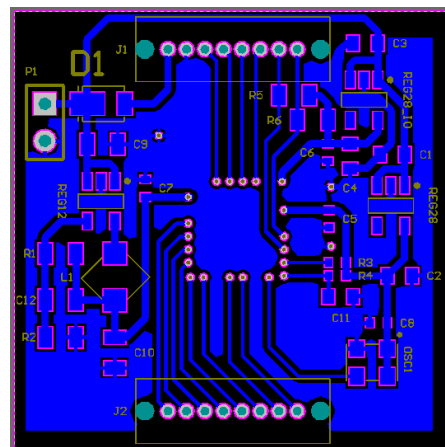


Figura 5.4: Sinais disponibilizados para o exterior pela Lepton 3.5.

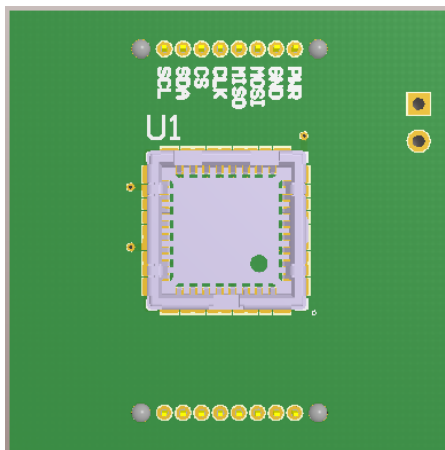
A PCB final para uso do sensor CMOS, Lepton 3.5, é demonstrado na Figura 5.5.



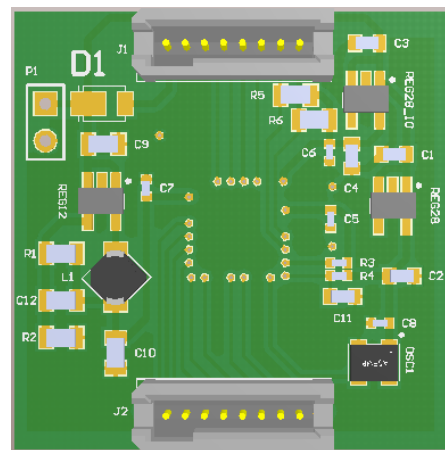
(a) Top view (2D).



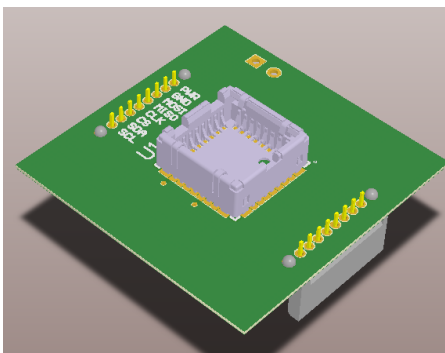
(b) Bottom view (2D).



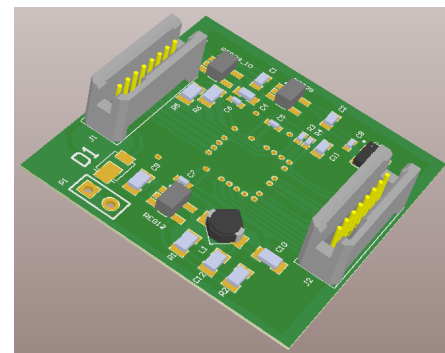
(c) Top view (3D).



(d) Bottom view (3D).



(e) Vista isométrica (Top 3D).



(f) Vista isométrica (Bottom 3D).

Figura 5.5: Várias perspectivas da PCB final da Lepton 3.5.

5.1.2 Raspberry Pi 4

Tendo em conta o *hardware* descrito anteriormente, a PCB de interligação entre a Lepton 3.5 e a Raspberry Pi 4, é simplesmente a ligação dos pinos da mesma, tendo em conta o seu *pinout*, com os pinos demonstrados na Figura 5.4. Tendo em conta que do conetor: J2, só será utilizado o pino *GPIO_3*, uma vez que os outros pinos, apesar de estar disponíveis fisicamente só são usados pela FLIR para programar o sensor, as ligações entre as duas PCB está representado na Figura 5.6.

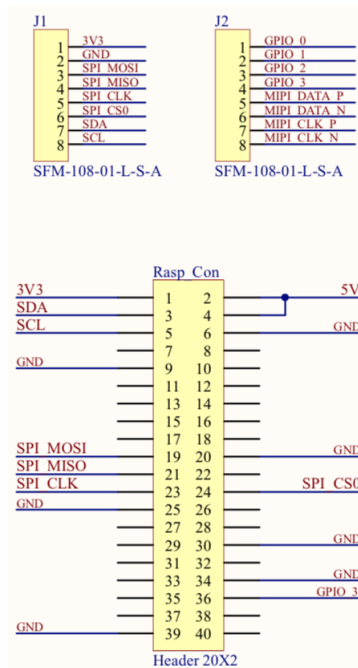
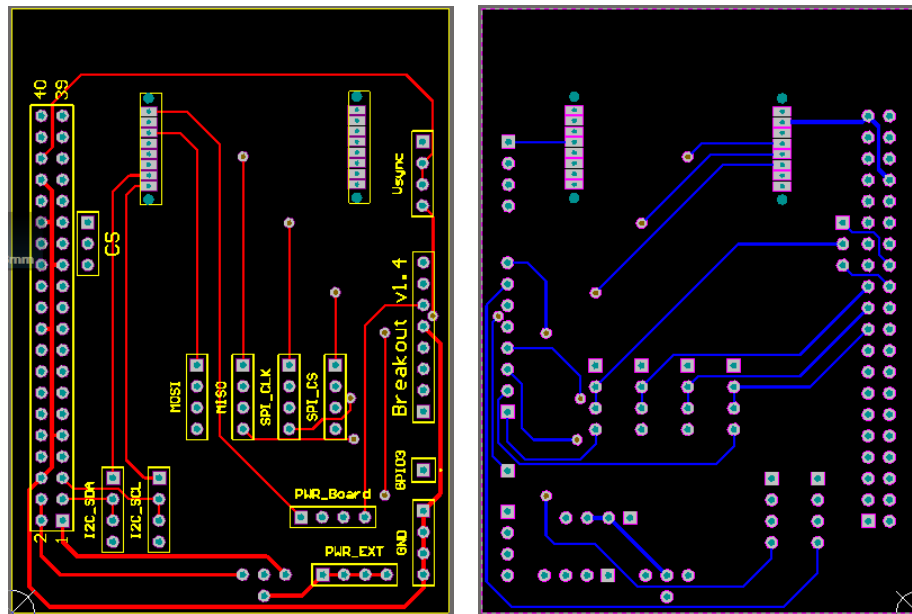


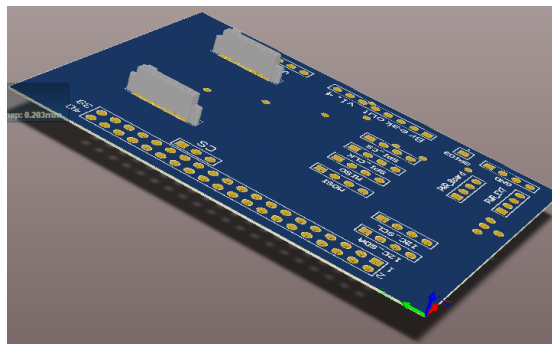
Figura 5.6: Ligações entre a Lepton 3.5 e a Raspberry Pi 4.

A PCB final está demonstrada na Figura 5.7.



(a) Top view (2D).

(b) Bottom view (2D).



(c) Vista isométrica (3D).

Figura 5.7: Várias perspectivas da PCB final da Raspberry Pi 4.

5.1.3 Custos de produção do hardware

Um dos principais objetivos desta dissertação é construir um sistema IR de baixo custo, assim será possível ao laboratório reproduzir vários sistemas destes para integração em mais do que um dos robôs já existentes ou simplesmente para substituição.

Na tabela 5.1 apresentam-se todos os componentes usados na elaboração de cada uma das PCB's apresentadas nas seções 5.1.1 e 5.1.2, assim como os respectivos preços unitários.

Como se pode ver na tabela 5.1, os custos associados à produção de apenas um

Tabela 5.1: Tabela de custos associados à produção do sistema *low-cost* IR

Num.:	Descrição	Designação na PCB	Quantidade (UN.)	Custo (UN./€)	Total (€)
1	Header 1x2	P1	1	0,10	0,10
2	Diodo SBR 30V 3A	D1	1	0,41	0,41
3	IC REG BUCK 3.3V 0.6A SYNC SOT23	REG12	1	1,14	1,14
4	Conector 8 Pinos (TFM-108-01-L-S-A)	J1 e J2	2	2,81	5,62
5	OSC MEMS 25,000MHZ CMOS SMD	OSC1	1	1,03	1,03
6	IC REG LINEAR 2.8V 400MA SOT23-5	REG28.IO e REG28	2	0,402	0,804
7	Resistors - SMD 1/4W 280K OHM 1%	R1	1	0,082	0,082
8	Resistors - SMD 0.1%, 200K OHM	R2	1	0,197	0,197
9	FIXED IND 2.2UH 1.6A 94 M OHM SMD	L1	1	0,958	0,958
10	CAP CER 4.7UF 6.3V X5R 0805	C9	1	0,508	0,508
11	Ceramic Capacitor - 0805 12pF 200volts C0G 5%	C12	1	0,443	0,443
12	CAP CER 10UF 6.3V X5R 0805	C10	1	0,336	0,336
13	CAP CER 0.1UF 16V X7R 0402	C1, C2, C3, C4, C5, C6, C7, C8 e C11	9	0,131	1,179
14	RES SMD 100K OHM 1% 1/10W 0402	R3	1	0,241	0,241
15	RES SMD 10K OHM 1% 1/10W 0402	R4	1	0,241	0,241
16	RES PULL-UP I2C 4.7K OHM	R5 e R6	2	0,082	0,164
17	Conetor Molex (105028-1001)	U1	1	1,56	1,56
18	Lepton 3.5	Sensor CMOS	1	168,81	168,81
19	Conector 8 pinos (SFM-108-01-L-S-A)	---	2	3,54	7,08
20	Conector 40 pinos Raspberry Pi 4 (SSQ-120-04-G-D)	---	1	6,13	6,13
21	PCB Lepton 3.5	---	5	0,338	1,69
22	PCB Interface Lepton 3.5 - Raspberry Pi 4	---	5	0,338	1,69
23	Raspberry Pi 4	---	1	61,73	61,73
24	Cartão de memória MicroSD 16GB	---	1	9,99	9,99
Total:					272,10 €

o sistema *low-cost* IR é de, aproximadamente, 272 euros. Em que a parte mais cara de todo o sistema *low-cost* IR é o próprio sensor CMOS Lepton 3.5.

5.2 Caixa Raspberry Pi

Depois de finalizadas as PCB's da Lepton e da Raspberry Pi foi necessário construir uma caixa que feche todo o sistema construído, isto porque se pretende utilizar todo o sistema num drone existente no laboratório. A Figura 5.8, demonstra a caixa construída.

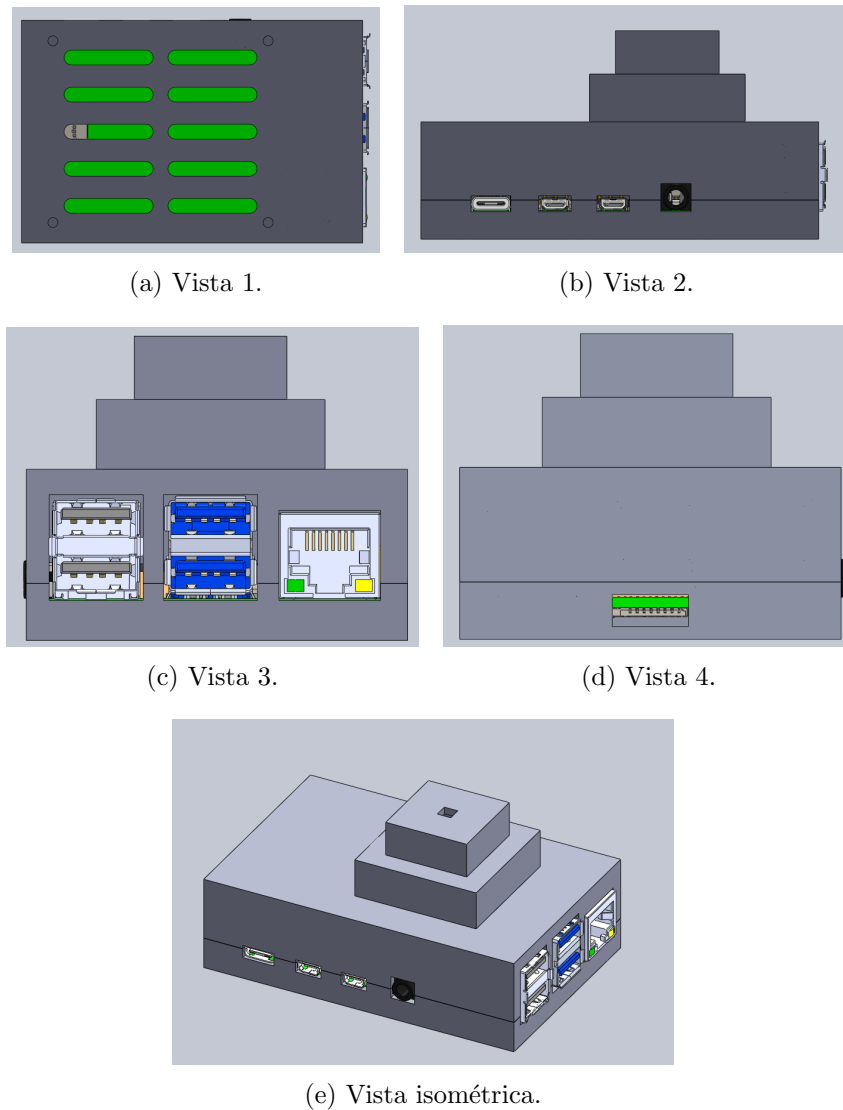


Figura 5.8: Várias perspectivas da caixa construída para a Raspberry Pi 4.

5.3 Sensor CMOS Lepton 3.5

5.3.1 Modos de operação

Com o sensor Lepton 3.5 é possível obter dois formatos de vídeo: 24-bits RGB e RAW 14-bits, cujo o valor dos pixels correspondem ao fluxo de luz de entrada. Ambos os formatos serão descritos com mais detalhes na secção 5.3.3. Estão disponíveis vários recursos com o sensor Lepton 3.5, sendo os mais importantes:

- Flat-Field Correction (FFC);
- Telemetria;
- Radiometria;
- Automatic Gain Control (AGC).

FFC

O sensor, Lepton 3.5, deve produzir imagens uniformes ao visualizar uma cena de temperatura uniforme. Um dos efeitos que derivam dos longos períodos de funcionamento é a degradação das imagens, tornando-as mais granuladas e/ou manchadas (ver Figura 5.9). Para corrigir este problema, podemos usar o recurso FFC. FFC é um processo de exposição breve do sensor a uma cena térmica uniforme, permitindo que o seu mecanismo de processamento de sinal seja calibrado automaticamente para produzir uma qualidade de imagem ideal. Todo o processo de calibração leva menos de um segundo. O modo FFC pode ser configurado de 3 maneiras diferentes:

- Externo;
- Manual;
- Automático (*Default*).

O modo FFC externo, executado somente sob comando CCI, só deve ser escolhido quando a câmara estiver a gerar imagens de uma fonte externa que emita uma temperatura uniforme e conhecida.

O modo FFC manual também é executado somente sob comando CCI, mas quando este comando é executado o sensor fecha o seu *shutter* interno durante todo o processo.

No FFC automático, o sensor executa o FFC automaticamente nas seguintes condições:

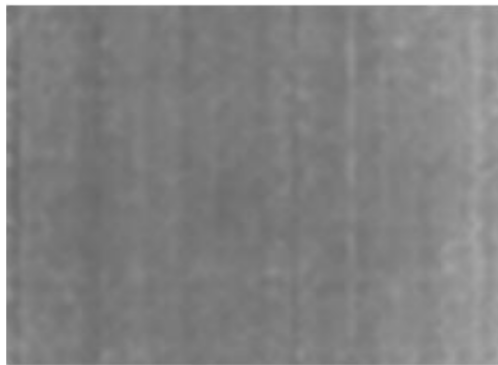
- No início;
- Após um período de tempo especificado (o valor *default* é de 3 minutos) decorrido desde o último FFC;
- Se a temperatura do sensor mudar mais do que um valor especificado (valor *default*: 1.5°C) desde o último FFC

O *trigger* de tempo e o *trigger* de mudança de temperatura descritos acima são ambos parâmetros ajustáveis via CCI. No entanto, os valores *default* são recomendados na maioria das condições operacionais.

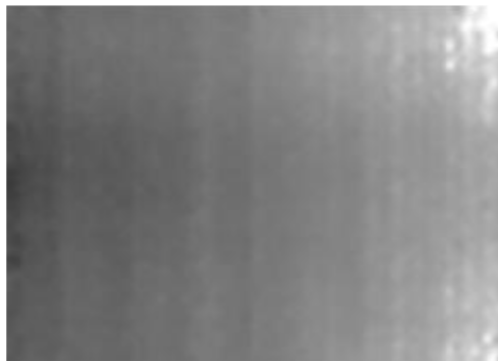
Neste projeto, vamos usar FFC automático com o *Shutter* interno da Lepton 3.5.



(a) Highly Uniform Image.



(b) Grainy Image.



(c) Blotchy Image.

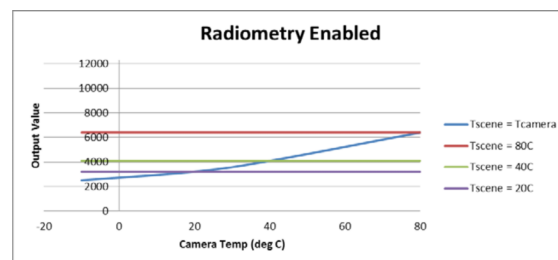
Figura 5.9: Exemplo de efeitos de degradação de imagens térmicas sem o uso de FFC.

Telemetria

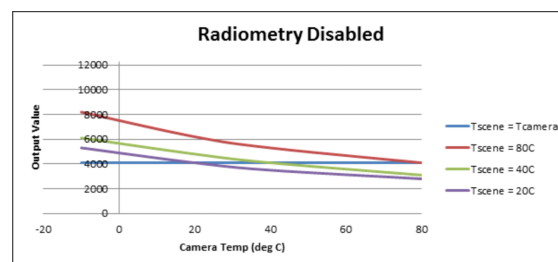
O modo de telemetria fornece informações adicionais sobre o estado atual do sensor. Esses dados são compactados e transmitidos a cada nova *frame*. Os dados compactados entre 656 e 976 bytes de tamanho por *frame* e, por exemplo, contém informações como tempo de inicialização, contador de *frames*, temperatura interna, contador de tempo no último FFC, estado FFC e muito mais. Para os nossos propósitos não é necessário nenhuma informação fornecida usando este recurso, então mantêm-se desabilitado e assim conseguimos reduzir tempo de transmissão durante a transferência de cada *frame*.

Radiometria

Os modos radiométricos afetam a maneira como o sensor traduz a radiação incidente com os valores de cada pixel. Quando a radiometria está ativada, o sensor garante que a conversão na saída do sensor para a temperatura da cena produz resultados constantes em toda a gama de temperaturas operacionais do sensor. Quando desativado, o valor de cada pixel, assumindo uma cena de temperatura constante, terão valores diferentes para diferentes temperaturas do sensor. A Figura 5.10 ilustra os efeitos hipotéticos de termos radiometria ativa ou desativa. Como precisamos converter a radiação incidente para a temperatura real da cena, este modo estará sempre ativo.



(a) Radiometria ativa.

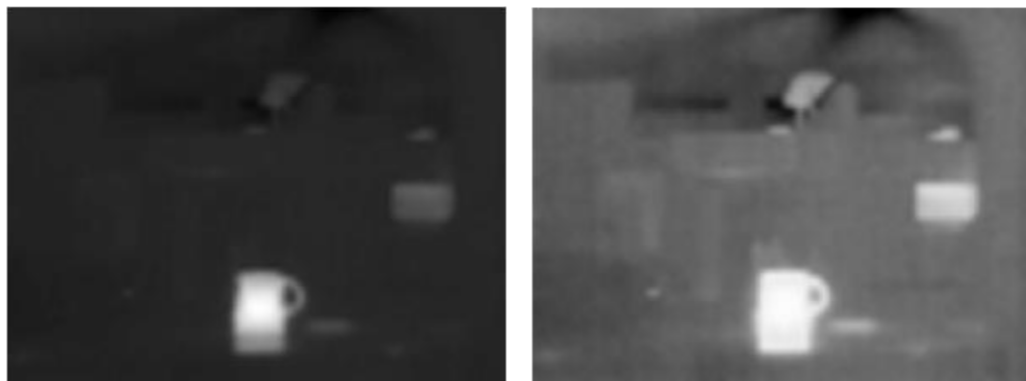


(b) Radiometria desativa.

Figura 5.10: Ilustração hipotética da saída do sensor *versus* temperatura do sensor.

AGC

o método de AGC é um processo pelo qual a grande faixa dinâmica do sensor infravermelho é reduzida a uma faixa mais apropriada para o sistema de exibição. Na forma mais simplista, o AGC pode ser um mapeamento linear. Para isso, basta encontrar, na imagem, o valor mais baixo e o mais alto e, de seguida, mapear todos os pixels entre esses dois valores em toda a imagem. O AGC linear, no entanto, tem uma grande desvantagem: a situação de ter, por exemplo, um objeto muito quente na frente de um fundo mais frio resultaria na perda de quase todos os detalhes do fundo, já que a maioria dos pixels seria mapeada para preto ou branco com muito pouco uso de tons de cinza no meio. Para eliminar esse problema, o sensor Lepton 3.5 usa um algoritmo AGC mais sofisticado, que é uma versão aprimorada de uma equalização de histogramas. A comparação da versão linear e do algoritmo de AGC do sensor está representada na figura 5.11. Por melhor que seja o algoritmo AGC da Lepton 3.5 para apresentar uma cena ao olho humano, não o vamos usar, pois queremos medir a temperatura da cena real e qualquer algoritmo AGC iria obscurecer completamente os valores de saída do sensor, tornando impossível determinar a temperatura real de um pixel.



(a) Método AGC Linear.

(b) Método implementado pela FLIR na Lepton 3.5.

Figura 5.11: Comparação do método AGC linear vs método implementado pela FLIR na Lepton 3.5.

5.3.2 Controle do sensor através do protocolo CCI

A Lepton 3.5 fornece uma interface de controle (CCI) muito idêntica ao I²C. A única diferença, em comparação com I²C tradicional, é que todas as transferências devem ter 16 bits, pois todos os registros da Lepton 3.5 têm 16 bits. O endereço CCI da Lepton 3.5 é

0x2A e comporta-se como um *Slave*. Alguns dos recursos que podem ser habilitados pela interface CCI são: configurações do recurso AGC, modo telemetria e a sua localização, seleccionar/carregar *Lookup Tables*, formato do vídeo de saída, modo FFC, parâmetros FFC, modo de radiometria, informações de status do sensor, estatísticas e muito mais.

Registos CCI

A interface consiste num pequeno número de registos através dos quais um dispositivo *Master* pode enviar comandos e receber os valores desses mesmo registos. Esses registos podem ser vistos na Figura 5.12. Como já foi referido anteriormente, cada registo tem 16 bits e existem 4 registos de controlo e 16 *DATA Registers*. Além disso, existem ainda 2 registos adicionais (*Block DATA Buffer 0* e *Block DATA Buffer 1*) utilizados para grandes transações (como por exemplo, fazer *upload* de uma *Lookup Table*), cada um com 1024 bytes.

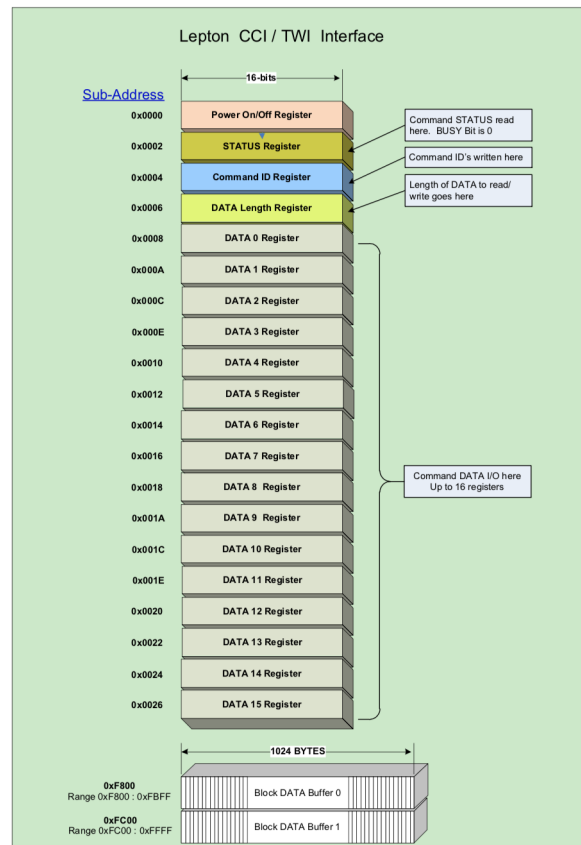


Figura 5.12: Registo CCI da Lepton 3.5.

O *Power On/Off Register* é usado para ligar o sensor após ter sido desligado por *software*. Isso é conseguido quando se coloca este registo com o valor 0.

Command ID Register

Para especificar um comando, o *Command ID Register* deve ser definido corretamente. A Figura 5.13 demonstra o *Command ID Register*. Um comando é identificado pelo módulo ID (bits 8-11) e, de seguida, por um comando ID (bits 2-7) em relação ao módulo especificado. Para cada módulo da Lepton 3.5, um *Command ID* exclusivo identifica o comando. O OEM bit (bit 14) é usado como medida de segurança - esse bit deve ser definido para executar comandos dos módulos OEM e RAD. Os últimos bits (0-1) identificam o tipo de comando.

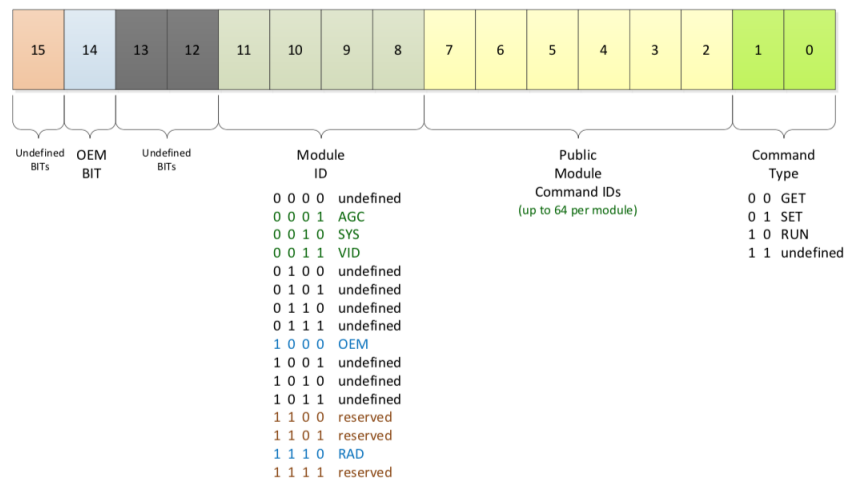


Figura 5.13: Formato *Command ID*.

Status Register

O *Status Register* da Lepton 3.5 contém informações sobre o comando e o estado de inicialização do sensor. A Figura 5.14 demonstra o *Status Register*. O *Boot Status* bit (bit 2) é 1 após uma inicialização bem-sucedida. O *Master* pode monitorizar este bit para saber quando é que o sensor foi inicializado.

Cada vez que um comando é enviado para o sensor, o *BUSY* bit (bit 0) é definido automaticamente. Quando o valor deste bit é 1, o sensor está a processar um comando e não aceita novos comandos. Quando o comando é concluído, um código de resposta de erro é escrito nos 8 bits mais significativos (bits 8-15) do registo e o *BUSY* bit é colocado

a 0. Se o código de resposta de erro for 0, o comando foi concluído com sucesso. Em qualquer outro caso, ocorreu um erro durante a execução do comando e um código específico de erro será escrito nos bits mais significativos de acordo com a documentação do fabricante [38].

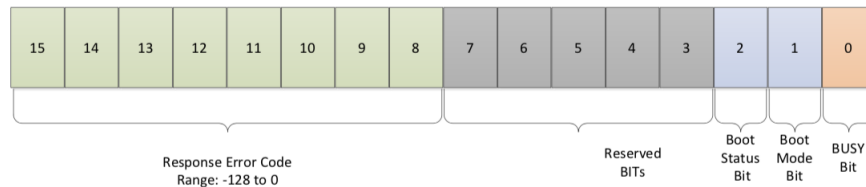


Figura 5.14: Formato registro *Status*.

Data Length Register

A maioria dos comandos requer que os dados sejam transferidos como parte de um comando do *Master* para o sensor ou vice-versa. Esses dados são guardados nos *DATA Registers*. Para se saber quantos *DATA Registers* foram configurados, seja pelo *Master* ao executar um comando SET ou para extrair informações do sensor usando um comando GET, usamos o *DATA Length Register*. O valor que for colocado neste registro é o número de *DATA Register* de 16 bits que serão usados durante o processamento do comando.

Módulos CCI

Os comandos são agrupados e identificados por módulos. Os módulos CCI da Lepton 3.5 são:

- AGC - Controle automático de ganho para brilho e contraste de imagem;
- SYS - Informação do sistema;
- VID - Controle de vídeo;
- OEM - Configuração de sistema OEM;
- RAD - Modulo de Radiometria.

Estes módulos encapsulam propriedades, atributos e métodos de um subsistema do sensor. Por exemplo, comandos correspondentes ao módulo AGC alteram o processo de controle automático de ganho, comandos correspondentes ao módulo SYS fornecem informações e *status* do sensor, e assim por diante.

Enviar comando para o sensor

A sequência necessária para que o envio de um comando seja bem-sucedido, usando a interface CCI, é a seguinte:

1. Byte com endereço do dispositivo (7 bits mais significativos) e bit que determina a operação de envio (bit 0 definido como 0);
2. Byte mais significativo do endereço onde queremos escrever;
3. Byte mais inferior do endereço para onde queremos escrever;
4. Byte mais significativo do valor de 16 bits a ser escrito no endereço especificado;
5. Byte menos significativo do valor de 16 bits a ser escrito no endereço especificado;
6. Repetir os passos 4 e 5 para escrever valores de 16 bits no próximo registro (endereço + 2);
7. Encerre a transmissão.

Como podemos observar na Figura 5.15, os bytes devem ser transmitidos sem interrupção. Se a transmissão for interrompida enviando um STOP bit (P), é necessário reenviar o endereço do dispositivo e o endereço do registro de destino.

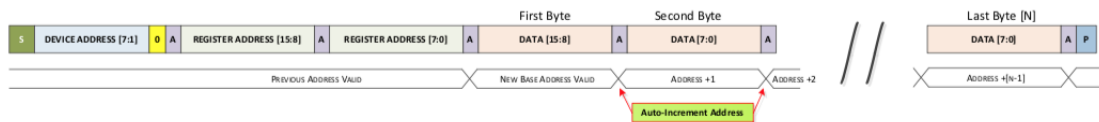


Figura 5.15: Envio sequencial para o sensor usando a interface CCI.

Ler comando do sensor

Para fazer a leitura de um determinado registro do sensor é um pouco mais complicado, pois são necessárias duas transmissões. Primeiro, temos que realizar uma operação de escrita para definir o endereço de destino do qual queremos fazer a sua leitura. Em segundo lugar, iniciamos uma segunda transmissão, desta vez uma de leitura, e começamos a ler os bytes do endereço que especificamos na transmissão anterior. Mais uma vez, após a leitura de cada byte, o endereço de destino aumenta automaticamente. A Figura 5.16 ilustra a leitura do sensor usando a interface CCI.

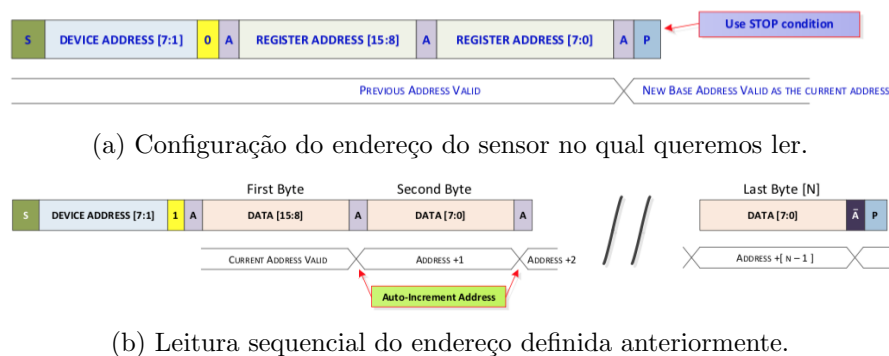


Figura 5.16: Exemplo de leitura de um registro do sensor usando a interface CCI.

A sequência necessária para uma leitura bem-sucedida usando a interface CCI é a seguinte:

1. Operação de escrita - definição do endereço de destino
 - (a) Byte com endereço do dispositivo (7 bits mais significativos) e bit que determina a operação de envio (bit 0 definido como 0);
 - (b) Byte mais significativo do endereço de onde queremos ler;
 - (c) Byte mais inferior do endereço de onde queremos ler;
 - (d) Fim da transmissão.
2. Operação de leitura - ler a partir do endereço de destino especificado
 - (a) Byte com endereço do dispositivo (7 bits mais significativos) e bit que determina a operação de envio (bit 0 definido como 1);
 - (b) Byte mais significativo do valor de 16 bits lido do endereço especificado;
 - (c) Byte mais inferior do valor de 16 bits lido do endereço especificado;
 - (d) Repetir os passos 2.b e 2.c para ler os valores de 16 bits do próximo registro (endereço + 2);
 - (e) Fim da transmissão.

Processo de execução dos comandos GET, SET, RUN

A interface CCI suporta três tipos de comandos:

- GET - o *Master* solicita dados do sensor (por exemplo, *Part-Number* do sensor);

- SET - o *Master* altera a configuração do sensor (por exemplo, definir o *output* de saída. Raw14 ou RGB888);
- RUN - o *Master* faz o sensor executar uma ação (por exemplo, fazer *Re-Boot* do sensor).

O envio de um comando GET segue a seguinte sequência:

1. Fazer *polling* do *Status Register* até que o *BUSY* bit se torne 0;
2. Escrever o número de registros de dados a serem lidos no *DATA Length Register*;
3. Escrever o comando ID no registro *Command ID Register*;
4. Fazer *polling* do *Status Register* até que o *BUSY* bit se torne 0;
5. Processar o código de erro na resposta do *Status Register*;
6. Se o comando for concluído sem erros, executar uma leitura sequencial dos *DATA Registers*.

O envio de um comando SET segue a seguinte sequência:

1. Fazer *polling* do *Status Register* até que o *BUSY* bit se torne 0;
2. Escrever os dados nos *DATA Registers*;
3. Escrever o número de registros de dados gravados no *DATA Length Register*;
4. Escrever o *command ID* no *Command ID Register*;
5. Fazer *polling* do *Status Register* até que o *BUSY* bit se torne 0;
6. Processar o código de erro na resposta do *Status Register*.

O envio de um comando RUN segue a seguinte sequência:

1. Fazer *polling* do *Status Register* até que o *BUSY* bit se torne 0;
2. Escrever o comando ID no registro *Command ID Register*;
3. Fazer *polling* do *Status Register* até que o *BUSY* bit se torne 0;
4. Processar o código de erro na resposta do *Status Register*.

Sequência de inicialização

Para se conseguir aceder ao sensor através do protocolo CCI, após liga-lo, é recomendada a seguinte sequência:

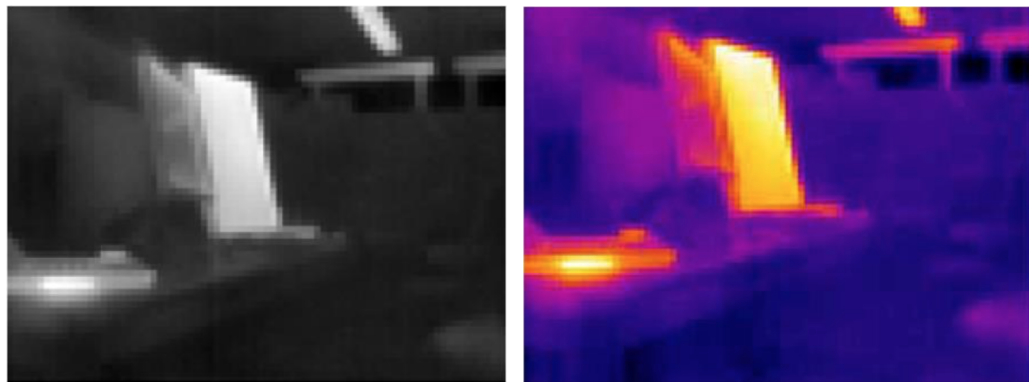
1. Aguardar 950 ms, no mínimo, após a inicialização/aplicação do *clock* principal do sensor (25 Mhz) (Estender para 5 s se tivermos o FFC automático);
2. Ler o *boot bit* do *status register*. Se o bit for 0, o sensor ainda não inicializou. Estender o tempo de espera e repetir este passo;
3. Ler o *BUSY* bit do *status register*. Se o bit for 1, continuar a fazer *polling* do valor até que este se torne 0;
4. O sensor está pronto para aceitar comandos.

5.3.3 Transferência de vídeo - VoSPI

Como já foi referido anteriormente, o sensor pode gerar imagens em dois formatos:

- Raw14 - Escala de cinzas de 1×14 bits (*default*);
- RGB888 - RGB 3×8 bits.

O primeiro modo é apropriado para visualizar ou processar dados *RAW* capturados pelo sensor. Por outro lado, para apresentação das imagens ao utilizador, pode-se utilizar o modo RGB888, que permite colorir a imagem capturada, de acordo com uma tabela de cores selecionada (*Lookup table*). O sensor Lepton 3.5 tem 8 tabelas de cores por defeito, no entanto, é possível carregar uma personalizada. A Figura 5.17 demonstra duas imagens capturadas pela Lepton 3.5, uma em tons de cinza e outra em modo RGB888. Para se obter imagens em modo RGB888 o recurso AGC deve ser habilitado. O *output* do sensor pode ser alterado usando comandos de controlo (CCI) - irei explicar com mais detalhe como funciona o protocolo na secção 5.3.2.



(a) Imagem Raw14.

(b) Imagem RGB888 com a Lookup table Fusion.

Figura 5.17: Comparação entre imagens obtidas em Raw14 e em RGB888.

Para transferir *frames* de vídeo do sensor para o dispositivo de controlo (*Master*), é usado o protocolo VoSPI, que utiliza o barramento SPI para transferir os dados. O protocolo é baseado em pacotes, sem sinais de tempo nem requisitos para controlo do fluxo de dados transferido pelo sensor. O *Master* SPI inicia todas as transações e fornece sinal de *clock* para o sensor Lepton 3.5, que funciona sempre como *Slave*.

Dessa forma, o *Master* pode extrair dados do sensor a uma velocidade flexível. Mas, a velocidade da transmissão é flexível apenas até um certo ponto: a menos que consigamos transferir todo o segmento de dados antes que um novo esteja disponível, o sensor dessincroniza e reinicia a transmissão. Isso é um problema comum a quem utiliza este sensor, causado pela transmissão não ser suficientemente rápida.

O VoSPI utiliza três linhas:

- SCK - Sinal de relógio;
- CS - *Chip Select*;
- MISO - Saída de dados do sensor.

O sinal MOSI, tipicamente a quarta linha do protocolo SPI, não é usado neste caso, pois não existe qualquer transferência de dados do *Master* para o sensor através deste protocolo. Sendo que o fabricante do sensor até recomenda que esta linha esteja diretamente ligada à massa ou então estar sempre com o nível lógico '0'. O protocolo VoSPI usa o modo SPI 3 (CPOL = 1, CPHA = 1) e transmite os dados com o byte mais significativo primeiro e na ordem *big-endian*.

O protocolo VoSPI está dividido da seguinte forma:

- Pacote VoSPI: O pacote representa a transação mínima entre o *Master* e o *Slave*. Cada pacote de vídeo contém dados de metade de uma linha de vídeo. Caso não haja novos segmentos de vídeo disponíveis, o sensor transmite pacotes com dados de lixo. Dependendo do formato de vídeo de saída, o pacote pode ter 164 ou 244 bytes;
- Segmento VoSPI: O segmento é definido como uma sequência contínua de pacotes VoSPI, representando um quarto de uma *frame* de vídeo. Para evitar a perda de sincronismo com o sensor, cada segmento deve ser lido antes que o próximo esteja disponível. Cada segmento tem 60 pacotes de comprimento. Se a telemetria estiver habilitado, o número de pacotes é 61;
- VoSPI *Frame*: a *frame* VoSPI representa toda a *frame* de vídeo, além disso, pode conter dados de telemetria. Uma *frame* é composta por 4 segmentos VoSPI.

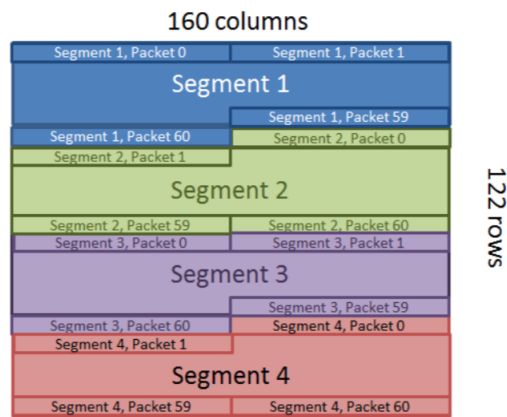
Na tabela 5.2 temos um resumo do número total de bytes em cada modo de operação do sensor. Sabendo o tamanho total de cada *frame* e que o sensor tem um *frame rate* de aproximadamente 26.4 *frames* por segundo, podemos calcular a taxa mínima de *clock* para a transmissão SPI na qual o *Master* precisa ler as *frames* do sensor para manter o sincronismo. No modo Raw14 sem telemetria, modo no qual teremos o sensor configurado, a taxa mínima de *clock* SPI é de 8.3 MHz. Para uma combinação diferente do formato de vídeo e recurso de telemetria, a velocidade do *clock* terá de ser maior. A taxa mínima de *clock* SPI, bem como o limite de velocidade máximo de *clock* SPI do sensor, 20 MHz, criam um limite, no qual o dispositivo *Master* deve comunicar com o sensor.

Tabela 5.2: Resumo do tamanho dos dados VoSPI em relação aos recursos usados

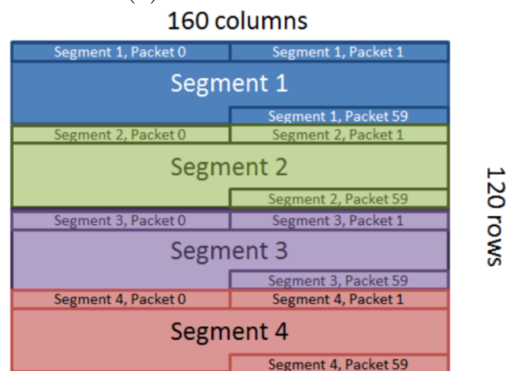
Telemetria desativa		
	Raw14	RGB888
Pacote VoSPI:	164 Bytes	240 Bytes
Segmento VoSPI:	60 pacotes, 9.84 Kbytes	60 pacotes, 14.64 Kbytes
VoSPI Frame:	4 segmentos, 240 pacotes, 39.36 Kbytes	4 segmentos, 240 pacotes, 58.56 Kbytes

Telemetria ativa		
	Raw14	RGB888
Pacote VoSPI:	164 Bytes	240 Bytes
Segmento VoSPI:	61 pacotes, 10.004 Kbytes	61 pacotes, 14.884 Kbytes
VoSPI Frame:	4 segmentos, 244 pacotes, 40.016 Kbytes	4 segmentos, 244 pacotes, 59.536 Kbytes

Na Figura 5.18 podemos verificar a composição de cada *frame* com a telemetria ativada e desativada.



(a) Telemetria ativada.



(b) Telemetria desativada.

Figura 5.18: Composição da *frame* VoSPI com e sem telemetria.

Os primeiros 4 bytes de cada pacote contêm um cabeçalho de pacote (Figura 5.19). O cabeçalho contém um ID de 2 bytes e um CRC para detecção de erros de 2 bytes. Os restantes bytes no pacote contêm os valores de cada pixel da imagem.

ID	CRC	Payload
4 bytes		160 or 240 bytes (depending upon bit resolution setting)

Figura 5.19: Estrutura do pacote VoSPI.

De acordo com a Figura 5.20, que ilustra o cabeçalho do pacote, o primeiro bit é sempre zero, seguindo de três bits TTT que codificam o número do segmento (1-4), mas apenas para o pacote número 20, e os próximos doze bits contêm o número de pacote. Para todos os outros pacotes, exceto o número 20, os bits TTT não precisam de conter informações de segmento válidas. Um exemplo de um pacote VoSPI válido pode ser

visto na Figura 5.21.

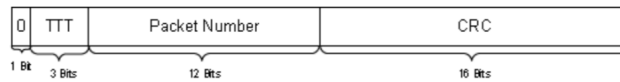


Figura 5.20: Estrutura do cabeçalho do pacote VoSPI.

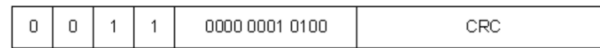


Figura 5.21: Exemplo de um pacote VoSPI válido, com o número 20 pertencente ao segmento 3.

No caso do pacote número 20 conter os bits TTT com o valor 0, todo o segmento é inválido e deve ser descartado. Se os 2 bytes de ID tiverem o valor xFxx (onde 'x' significa *don't care*) (como na Figura 5.22), todo o pacote é inválido e deve ser descartado.

ID	CRC	Payload
xFxx	xxxx	Discard data (same number of bytes as video packets)

Figura 5.22: Exemplo de um pacote VoSPI inválido.

Na transferência de *frames*, o conteúdo do *payload* depende do modo selecionado:

- Para o modo Raw14 (*default*), o *payload* tem 160 bytes de comprimento. Excluindo as linhas de telemetria, cada pacote contém informação de 80 pixels da imagem (com AGC desativado, os primeiros dois bits da *word* de dois bytes de cada pixel são sempre definidos como 0; se AGC estiver ativado, os primeiros oito bits são definidos como 0);
- Para o modo RGB888, o *payload* tem 240 bytes de comprimento. Excluindo as linhas de telemetria que são possíveis de configurar neste modo, cada pacote contém informação de 80 pixels da imagem em que o valor de cada pixel está codificado em 3 bytes.

Cada um dos casos está ilustrado nas seguintes Figuras, 5.23 e 5.24, de codificação do *payload*.

Byte 0	Byte 1	Byte 2	Byte 3	...	Byte 158	Byte 159
Line m		Line m		...	Line m	
Pixel 0		Pixel 1		...	Pixel 79	

Figura 5.23: Codificação do valor de cada pixel no modo Raw14.

Byte 0	Byte 1	Byte 2	Byte 3	Byte 4	Byte 5	...	Byte 237	Byte 238	Byte 239
Line m	Line m	Line m	Line m	Line m	Line m	...	Line m	Line m	Line m
Pixel 0	Pixel 0	Pixel 0	Pixel 1	Pixel 1	Pixel 1	...	Pixel 79	Pixel 79	Pixel 79
R	G	B	R	G	B	...	R	G	B

Figura 5.24: Codificação do valor de cada pixel no modo RGB888.

O procedimento para se estabelecer o sincronismo com o sensor é o seguinte:

1. Retirar a linha CS e o SCK por pelo menos 185 ms. Este passo garante o *timeout* do VoSPI e coloca a Lepton 3.5 num estado adequado para restabelecer o sincronismo;
2. Ativar o CS e o SCK. Isso faz com que a Lepton 3.5 comece a transmitir pacotes;
3. Ler todos os pacotes. Verificar o campo ID do cabeçalho do pacote para reconhecer pacotes inválidos;
4. Continuar a ler os pacotes. E o primeiro pacote de vídeo válido deve ser transmitido em 10 ms.

Existem duas transgressões ao ler *frames* do sensor que causam a perda de sincronismo:

- Todos os pacotes de um segmento devem ser lidos antes do próximo segmento estar disponível;
- Todos os segmentos de uma *frame* devem ser lidos antes que a próxima *frame* esteja disponível. Isso também aplica-se a frames inválidos.

As seguintes Figuras, 5.25, são exemplos das transgressões que se podem cometer e que levam à perda de sincronismo.

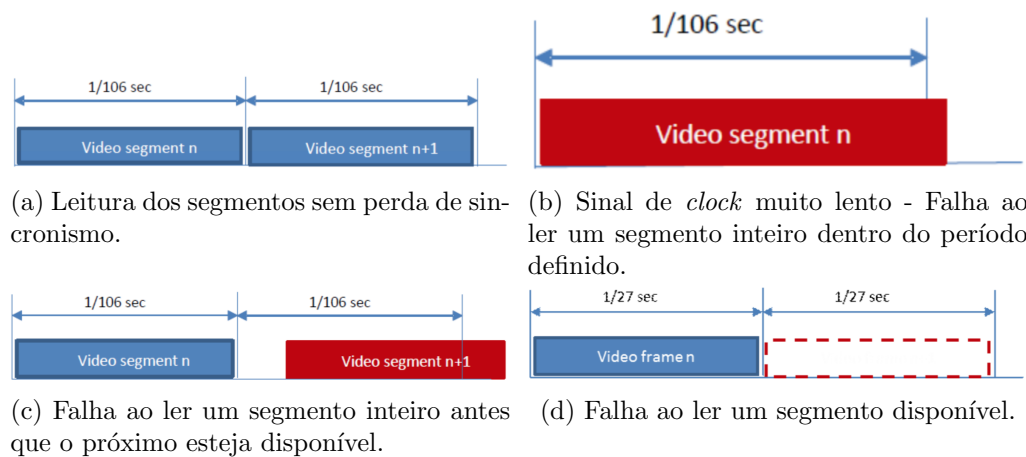


Figura 5.25: Exemplos de transgressões que geram perda de sincronismo na Lepton 3.5.

O protocolo VoSPI foi projetado de forma a que não sejam precisos sinais de temporização. No entanto, o sensor Lepton 3.5 fornece um pulso de saída de temporização que pode ajudar a otimizar a temporização do *Master*. Por exemplo, o *Master* pode ler dados à frequência máxima e depois ficar à espera até que o próximo pulso de temporização do segmento seja recebido. O pulso é ativado selecionando o modo VSYNC GPIO por meio do protocolo CCI. Quando ativado, o pulso é fornecido no pino GPIO3. O sinal pode ser configurado (também por meio do protocolo CCI) para antecipar ou atrasar o início do pulso (ou seja, o tempo em que o próximo segmento está pronto para ser lido) em -3 a $+3$ períodos de linha (aproximadamente $-1,5$ ms a $+1,5$ ms). Por *default*, o pulso não é adiantado ou atrasado. Neste projeto temos o modo VSYNC GPIO ativo mas sem qualquer atraso ou adiantamento na recepção do sinal.

5.4 Driver aquisição

Nas secções 5.3.2 e 5.3.3 podemos verificar como é que é possível configurar o sensor através da interface de controlo CCI e como é que obtemos imagens/vídeo do sensor.

A *Raspberry Pi 4* é um computador *low-cost* que reúne todos os requisitos mínimos necessários para a interação com o sensor, e permite desenvolver o driver de aquisição na *framework* desejada, ROS. Por isso, foi o computador embebido escolhido para o desenvolvimento do driver de aquisição para a Lepton 3.5. O sistema operativo escolhido é baseado em Linux e é o *Raspberry Pi OS*. É um dos sistemas operativos mais utilizados na *Raspberry Pi* e, por isso mesmo existe muita informação sobre ele.

Para poder comunicar e controlar a Lepton 3.5 foi necessário ativar os periféricos de

I²C e SPI e instalar a última versão disponível para a *Raspberry Pi 4* do ROS, ROS Melodic.

Depois da ativação dos periféricos necessários e instalada a *framework* no qual foi desenvolvido todo o software, a Figura 5.26 representada a *main* do driver de aquisição.

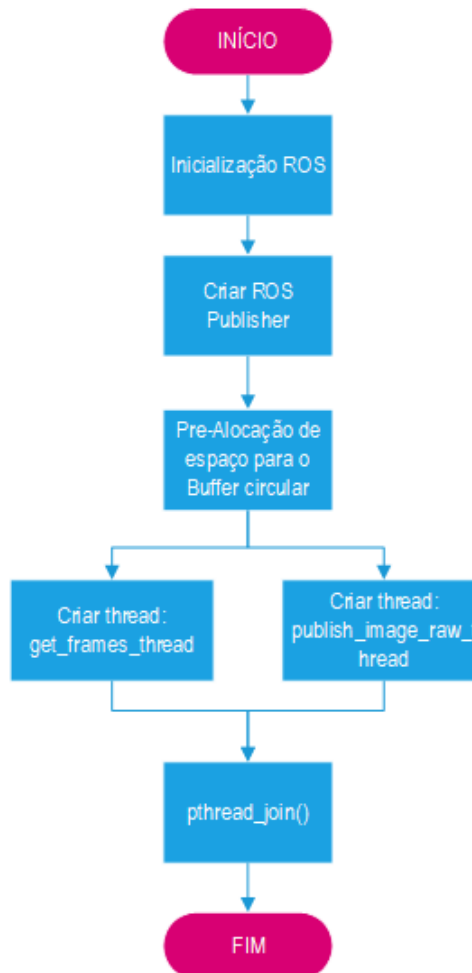


Figura 5.26: Fluxograma da *main* do driver de aquisição.

Como se pode verificar na Figura 5.26, o uso da *framework* ROS requer que se inicialize e crie um *node*¹ *publisher* que transmitirá continuamente uma mensagem. Em seguida, é criado um *Buffer* circular ou *Ring Buffer* onde serão guardadas todas as *frames* válidas que vamos recebendo do sensor. Tendo em conta que se pretende adquirir e visualizar em tempo real as *frames* recebidas pelo sensor, optou-se por criar duas

¹Termo ROS para um executável que está ligado à rede ROS

threads distintas:

- *get_frames_thread*: Responsável pela aquisição de novas *frames* do sensor;
- *publish_image_raw_thread*: Responsável pela verificação da existência de novas *frames* no *buffer* circular e, caso existam novas *frames* que ainda não foram publicadas, publica-las.

Na Figura 5.27 e 5.28 podemos verificar com mais detalhe o propósito de cada uma das *threads* criadas.

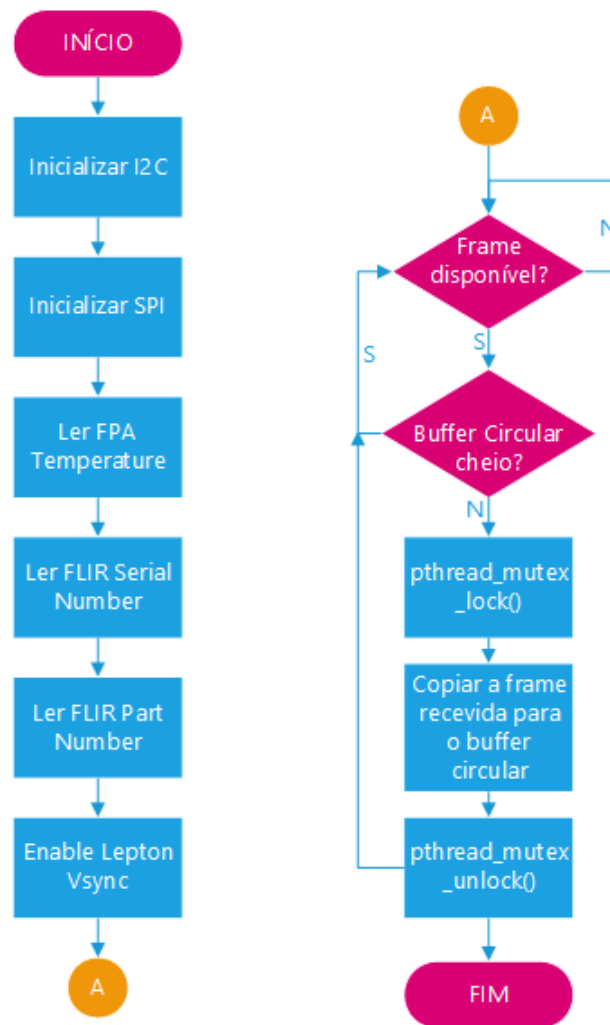


Figura 5.27: Fluxograma *thread: get_frames_thread*.

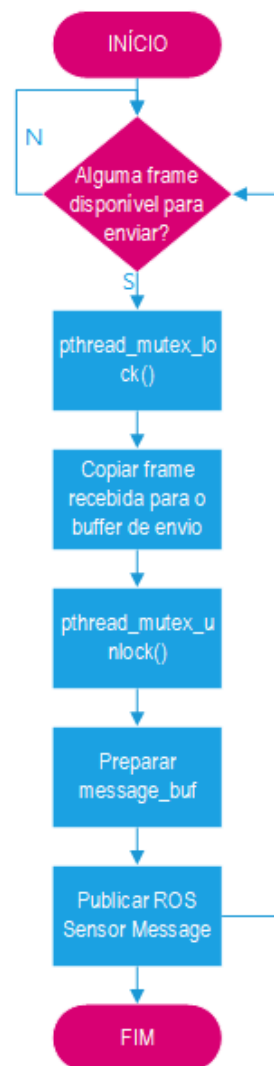


Figura 5.28: Fluxograma *thread: publish_image_raw_thread*.

Uma função bastante importante no *driver* e que é um complemento à *thread* de aquisição, *get_frames_thread*, é a função: `transfer_segment()`. Esta função é a *callback function* que foi configurada na inicialização da interrupção do periférico SPI, que lê todos os pacotes recebidos da Lepton 3.5 até que se consiga determinar se o conjunto de pacotes recebidos é para guardar ou descartar. No final, armazena a *frame* num *buffer* local e define a *flag*, `frame_captured = 1`, quando uma *frame* válida é lida.

Os fluxogramas das Figuras 5.29, 5.30, 5.31 e 5.32 demonstram com mais detalhe todas as verificações que são feitas aos pacotes que vamos recebendo do sensor, com base

naquilo que já foi referido na secção 5.3.3.

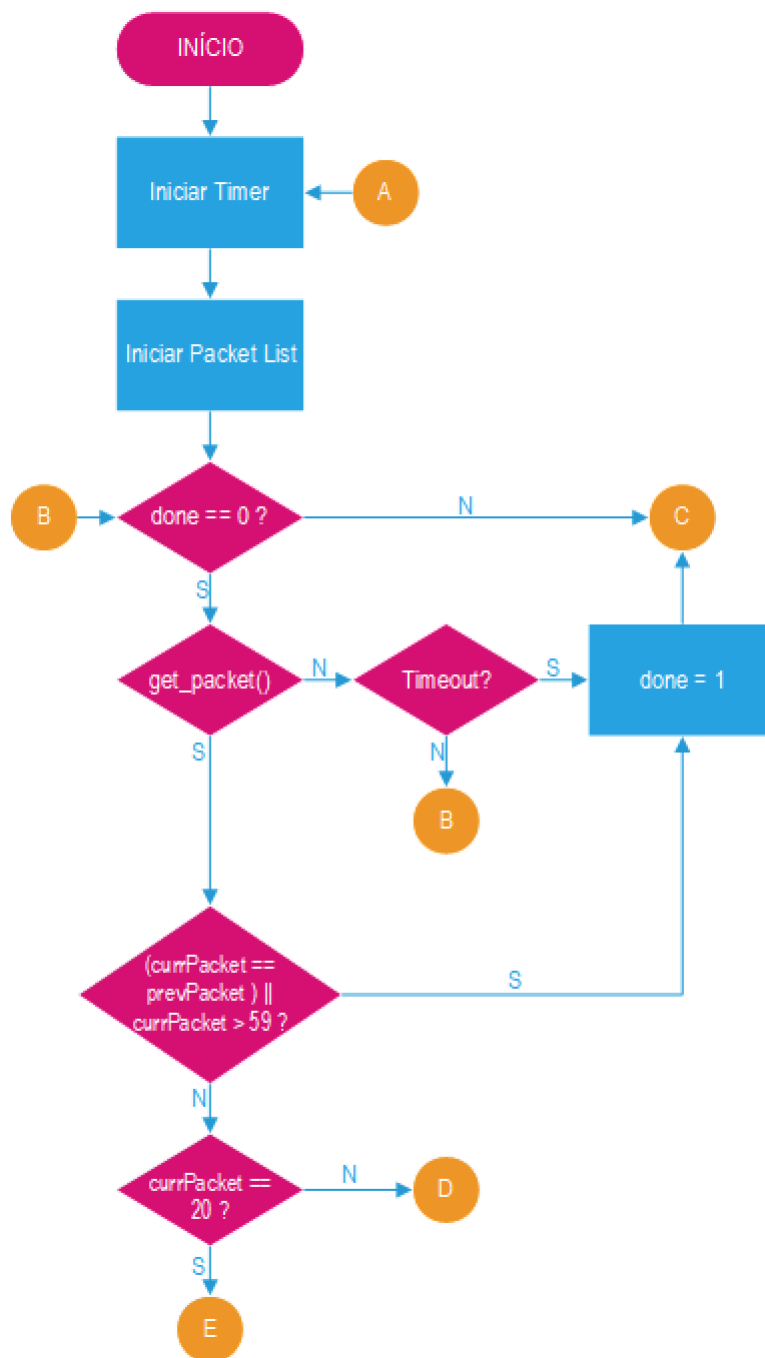


Figura 5.29: Fluxograma função: transfer_segment(), Parte 1.

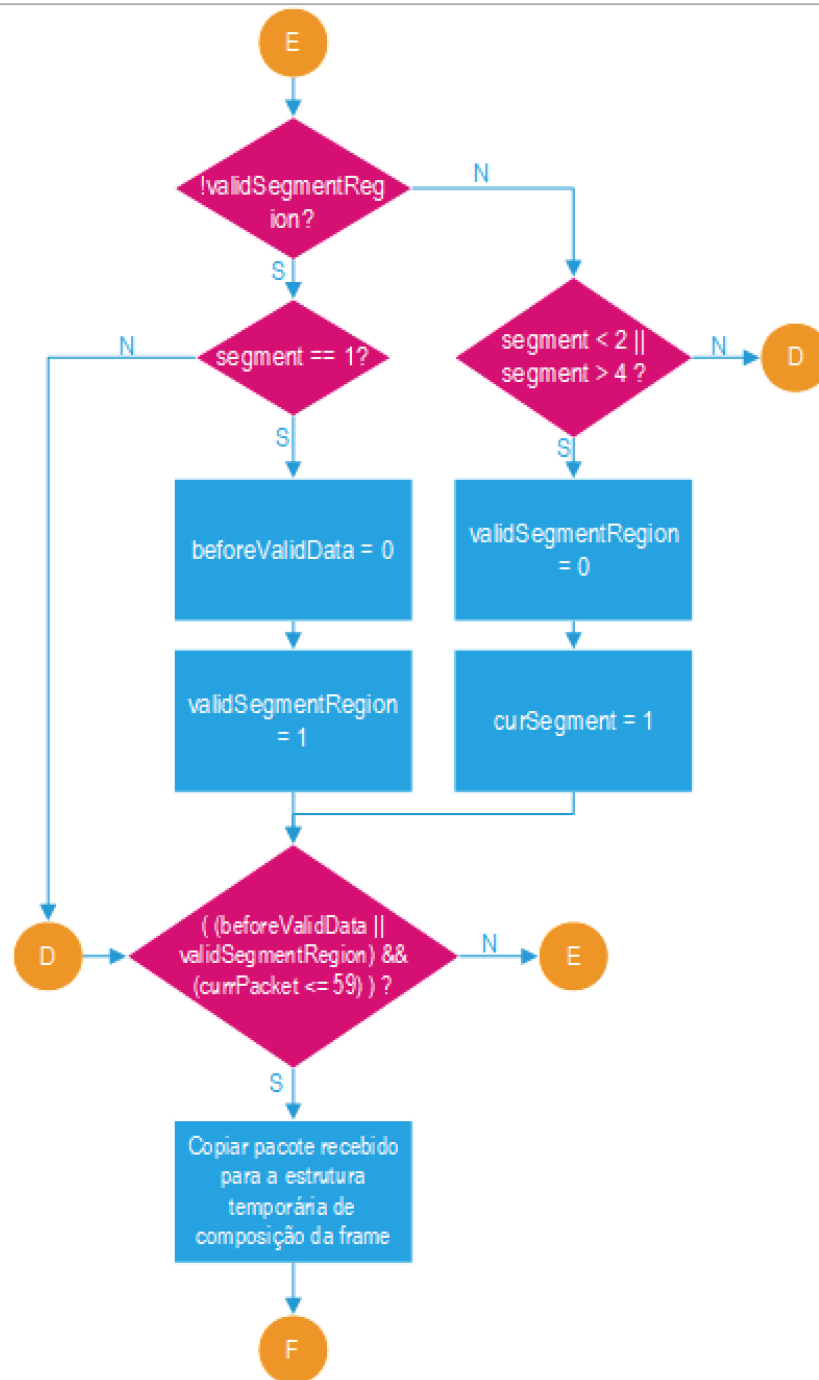


Figura 5.30: Fluxograma função: `transfer_segment()`, Parte 2.

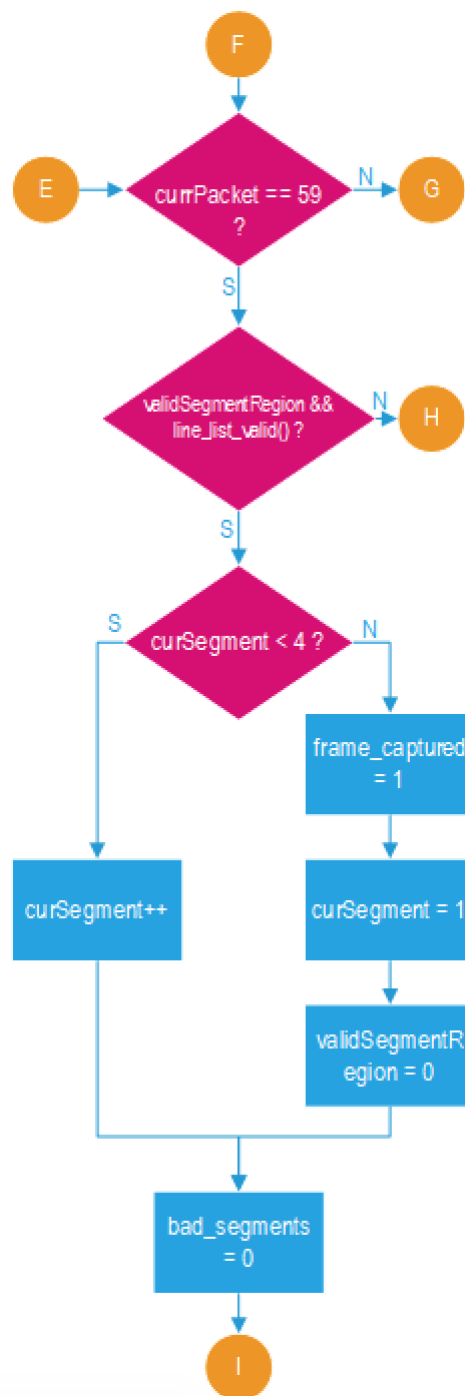
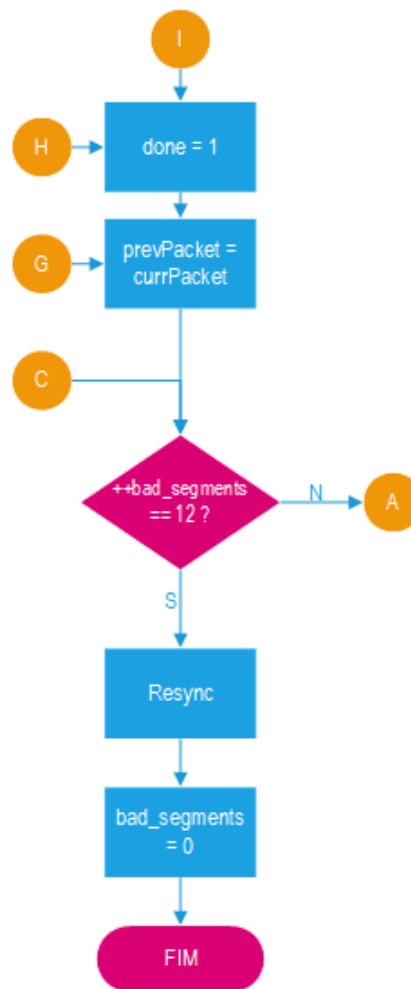


Figura 5.31: Fluxograma função: transfer_segment(), Parte 3.

Figura 5.32: Fluxograma função: `transfer_segment()`, Parte 4.

Um *publisher* em ROS pode publicar diferentes tipos de mensagens. Neste caso, o *node* que foi criado irá publicar, à medida que tivermos novas *frames* para serem processadas, uma mensagem do tipo: `sensor_msgs/Image Message`. Este tipo de mensagem já está definida nas APIs do ROS e é muito utilizada pela comunidade quando estamos a lidar com processamento de imagem. A mensagem tem a estrutura das Figuras 5.33 e 5.34.

```
Header header      # Header timestamp should be acquisition time of image
                  # Header frame_id should be optical frame of camera
                  # origin of frame should be optical center of camera
                  # +x should point to the right in the image
                  # +y should point down in the image
                  # +z should point into to plane of the image
                  # If the frame_id here and the frame_id of the CameraInfo
                  # message associated with the image conflict
                  # the behavior is undefined

uint32 height      # image height, that is, number of rows
uint32 width       # image width, that is, number of columns
```

(a) sensor_msgs/Image.msg - Raw Message Definition 1.

```
string encoding    # Encoding of pixels -- channel meaning, ordering, size
                  # taken from the list of strings in include/sensor_msgs/image_encodings.h

uint8 is_bigendian # is this data bigendian?
uint32 step        # Full row length in bytes
uint8[] data       # actual matrix data, size is (step * rows)
```

(b) sensor_msgs/Image.msg - Raw Message Definition 2.

Figura 5.33: Estrutura de uma mensagem do tipo sensor_msgs/Image.msg.

```
# sequence ID: consecutively increasing ID
uint32 seq
#Two-integer timestamp that is expressed as:
# * stamp.sec: seconds (stamp_secs) since epoch (in Python the variable is called 'secs')
# * stamp.nsec: nanoseconds since stamp_secs (in Python the variable is called 'nsecs')
# time-handling sugar is provided by the client library
time stamp
#Frame this data is associated with
string frame_id
```

Figura 5.34: std_msgs/Header.msg - Raw Message Definition.

5.5 Interface gráfica

Com o intuito de se poder visualizar as imagens que vão sendo publicadas no tópico referido na secção anterior, secção 5.4, foi criada uma aplicação que subscreve às mensagens publicadas pelo tópico: /flir_lepton/image_raw, converte os valores de cada pixel da imagem em temperatura e apresenta ao utilizador.

Como a *Raspberry Pi* 4 e a Lepton 3.5 são um único sistema e existe a necessidade de exibir as imagens adquiridas pelo sensor num outro sistema, neste caso um computador remoto, temos que fazer um export ROS_MASTER_URI na *Raspberry Pi* 4 e no computador onde temos o *node* de visualização. Abrindo um terminal e escrevendo o seguinte comando: echo \$ROS_MASTER_URI, iremos ter algo deste género: http://192.168.0.10:11311. Estes valores especificam o \<ip>= 192.168.0.10 e \<port>= 11311. O ip também é conhecido como *host* e denota o endereço do compu-

tador que está a executar o *roscore*. Por isso, depois de executado o comando: `export ROS_MASTER_URI = 'http://192.168.0.10:11311'`, em ambos os sistemas e executado ambos os *nodes* temos como primeiro resultado a Figura 5.35.

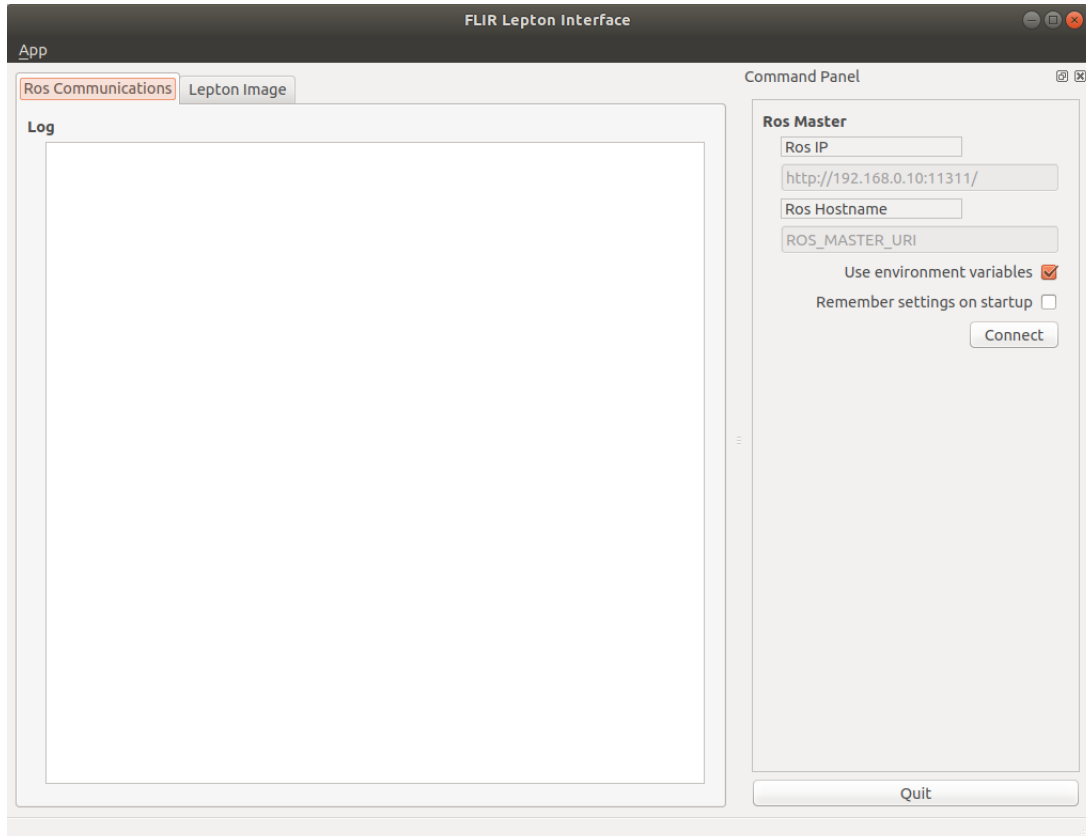


Figura 5.35: FLIR Lepton Interface - Main Tab Init.

A aplicação é composta por duas Tabs:

- Ros Communications - Esta Tab tem como intuito exibir alguma mensagens de Debug e a partir do momento que o utilizador carregar no botão: Connect irá aparecer a mensagem que está na Figura 5.36.
- Lepton Image - Tab responsável por mostrar em tempo real as *frames* que estamos a receber da Lepton 3.5.

A partir do momento que o utilizador clicar no botão: Connect, está a subscrever ao tópico publicado pelo driver de aquisição do sensor, podendo começar a ver em tempo real as imagens adquiridas pela Lepton 3.5 clicando na tab: Lepton Image. Mas como

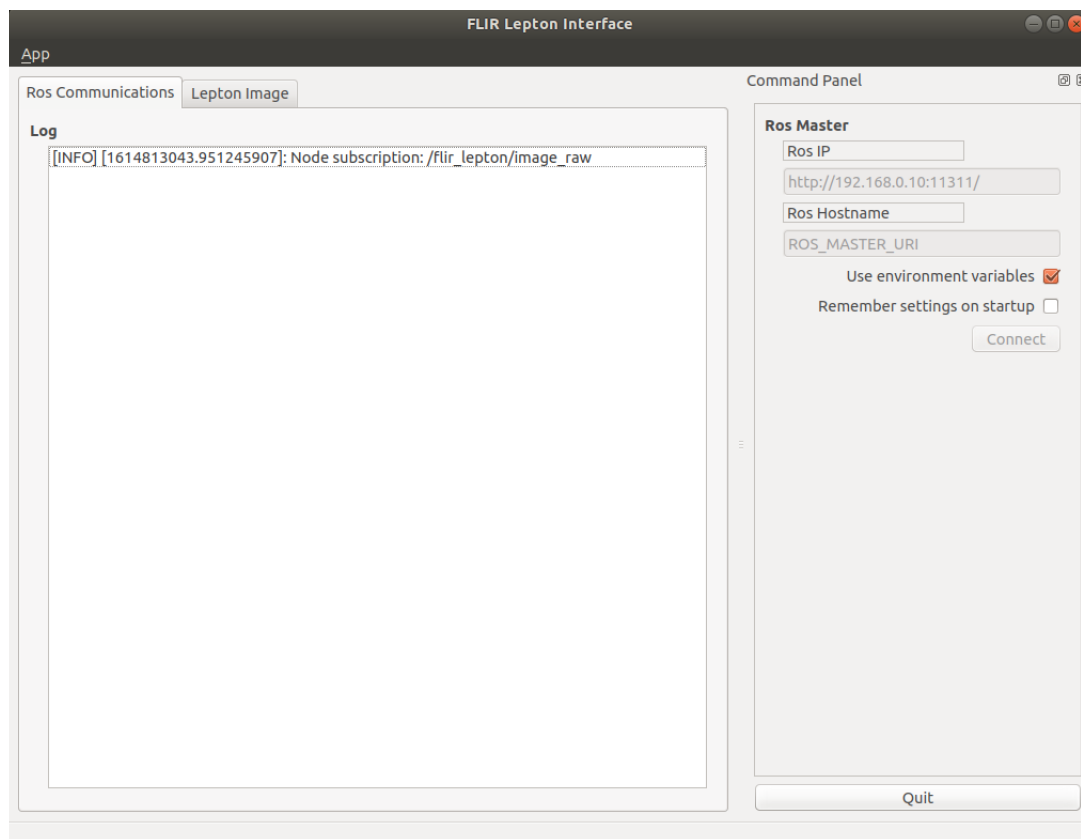


Figura 5.36: FLIR Lepton Interface - Main Tab Connect.

também nos interessa saber os valores de temperatura de cada pixel na *frame* capturada temos de ter em conta os seguintes aspetos:

- À medida que se vai recebendo novas *frames* é calculado o valor de temperatura de cada pixel dessa *frame* com recurso à fórmula 5.1 e guardado num vetor temporário esses mesmos valores de temperatura em graus celcius;
- Como já se tem os valores de temperatura de cada pixel consegue-se saber qual é o limite máximo e mínimo de temperatura da *frame* que acabamos de receber e mostra-se esses valores ao utilizador;
- Como foram utilizadas algumas funções do OpenCV para colorir as *frames* que se recebe do sensor em RAW14 teve-se de converter todos os valores de temperatura calculados a partir de um valor de 16 bits em 8 bits, ou seja, converteu-se a imagem de MONO16 em MONO8, porque as funções do OpenCV não permitem

usar imagens em MONO16. Para isso recorreu-se à formula 5.2. Assim sendo, todos os valores de temperatura inferiores ao limite de temperatura mínima foram convertidos em 0, os valores de temperatura iguais ou superiores ao limite máximo de temperatura foram convertidos em 254 e todos os outros valores de temperatura foram convertidos para valores entre 0 e 254.

$$temp_pixel_n = (Pixel_Value \times Sensor_Resolution) - 273.15 \quad (5.1)$$

$$new_temp = (temp_pixel_n - limite_inf) \times \left(\frac{254}{limite_sup - limite_inf} \right) \quad (5.2)$$

Nas Figuras 5.37 e 5.38 podemos ver algumas imagens que foram capturadas pelo sensor Lepton 3.5.



Figura 5.37: FLIR Lepton Interface - Lepton Image 1.

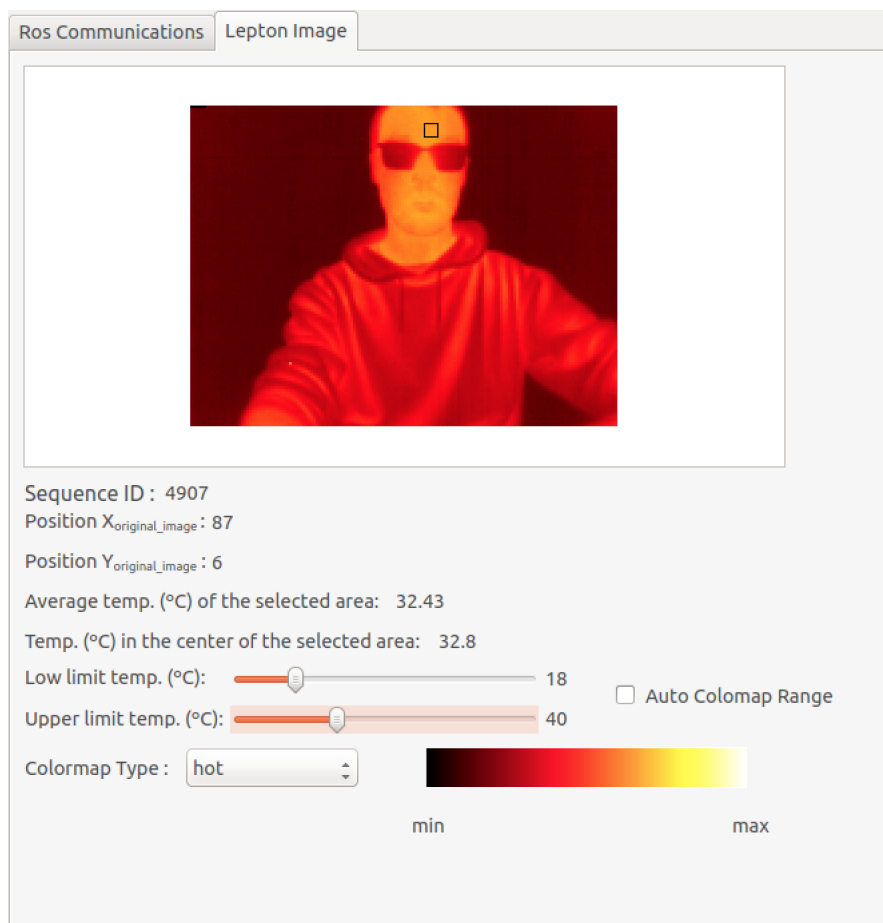


Figura 5.38: FLIR Lepton Interface - Lepton Image 2.

Algumas das features mais interessantes nesta aplicação são:

- O utilizador pode seleccionar a zona de temperatura no qual tem mais interesse em saber esses valores, bastando para isso arrastar para a zona desejada o quadrado de 10×10 pixels previamente definido. Depois de seleccionada a zona poderá ver o valor médio dessa zona e o valor de temperatura no centro de zona;
- Por defeito, se o utilizador não clicar na checkbox: Auto Colormap Range, o limite máximo e mínimo de temperatura vão sendo calculados e mostrados automaticamente ao utilizador, à medida que vamos recebendo novas *frames*, Figura 5.37. Caso contrário, o utilizador pode definir esses limites e o valor de temperatura e do *colormap* são ajustados a esses limites, Figura 5.38;

- Por último, o utilizador pode ainda definir um conjunto de 13 *colormaps* diferentes, como se pode ver na Figura 5.39.

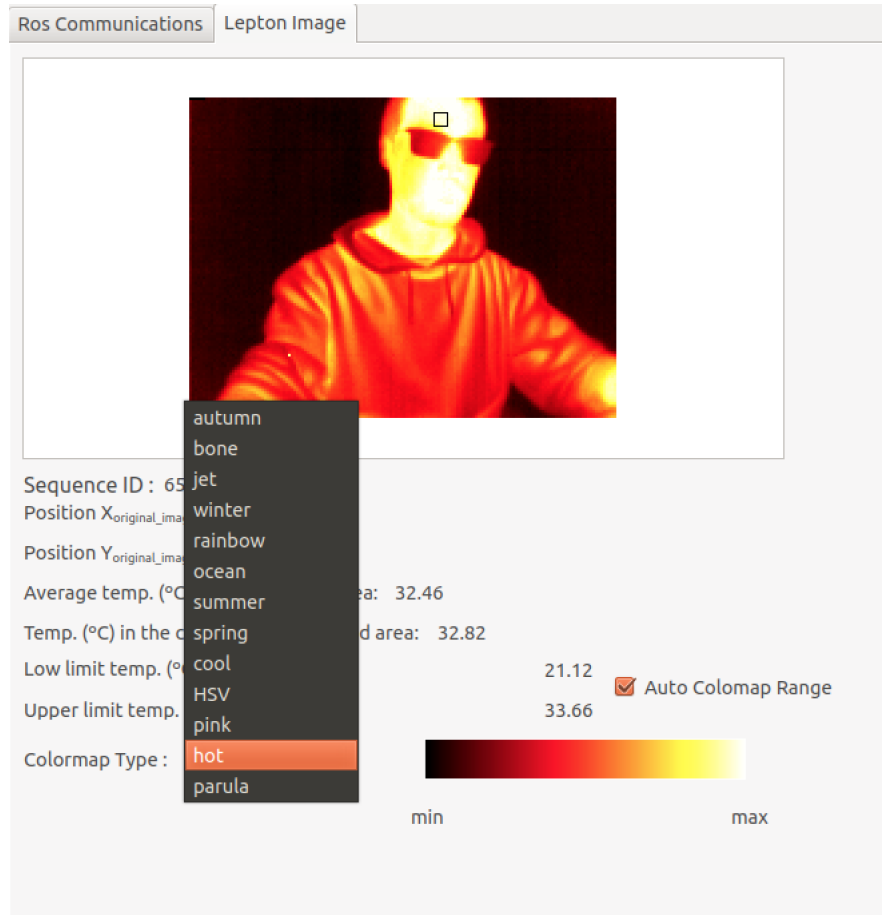


Figura 5.39: FLIR Lepton Interface - Diferentes tipos de *colormaps*.

Capítulo 6

Resultados

Neste capítulo serão apresentados alguns dos resultados obtidos com o sistema projetado no Capítulo 4 tanto a nível laboratorial como na aplicação desse mesmo sistema no UAV STORK do laboratório.

6.1 Resultados laboratoriais

A principal função de uma câmara infravermelha é detetar radiação térmica e convertê-la num sinal elétrico, que é então processado para produzir uma imagem térmica e serem realizados cálculos de temperatura. O calor detectado por uma câmara infravermelha pode ser medido com muita precisão, permitindo-nos não apenas monitorizar o desempenho térmico, mas também identificar e avaliar a gravidade de problemas relacionados com calor. Neste sentido, a análise do comportamento do sensor num ambiente controlado torna-se indispensável para uma melhor caracterização.

A caracterização do CMOS Lepton 3.5 será baseado no método utilizado pela autora da dissertação [37] que consiste em usar água como fonte de radiação. Segundo os resultados obtidos pela autora, este método é preciso, prático e de baixo custo. A água é uma fonte de calibração útil, pois está facilmente disponível e as suas propriedades óticas estão bem documentadas. É considerada uma fonte de calibração ideal, porque não absorve uma radiação significativa e fornece uma emissividade alta ($\varepsilon \approx 0,98$).

Para a caracterização do sensor foram utilizados as seguintes ferramentas:

- Água a diferentes temperaturas (Água à temperatura ambiente, água quente e água fria);
- Sensor DHT22 (Sensor de Humidade e Temperatura) com uma precisão de medição

de $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$;

- Sensor de temperatura submersível DS18B20 com uma precisão de medição de $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$;
- Dois suportes que permitiram colocar o sensor a diferentes distâncias da superfície da água (aproximadamente, 15.5 cm e 33.5 cm).

Para obter a temperatura da água foi utilizado o sensor de temperatura submersível DS18B20, Figura 6.1, localizado logo abaixo da superfície. O CMOS Lepton 3.5 foi montado por cima de um recipiente com água, a diferentes temperaturas, de modo a que o centro do recipiente coincidissem com o centro da imagem. Desta forma, a caracterização do sensor foi obtida com os valores de temperatura obtidos pelo sensor DS18B20 e pela temperatura média de uma Region of Interest (ROI) de 10 x 10 pixels em cada *frame* do sensor. Este método é eficaz porque a temperatura da água, que é capturada pela Lepton 3.5, é também medida pelo sensor localizado logo abaixo da superfície. Portanto, o tempo que decorre entre a medição da temperatura da água e a geração de imagens da água é muito curto. Isto ajuda a garantir que qualquer mudança na temperatura da água longe do sensor DS18B20, devido à transferência de calor com o meio ambiente, seja pequena.



Figura 6.1: Sensor de temperatura submersível DS18B20.

Para tentar perceber um pouco mais o efeito da variação da distância com a medição de temperatura foram utilizados dois suportes, que permitiram variar a altura entre o sensor e a superfície da água entre, aproximadamente, 15.5 cm e 33.5 cm.

Cada um dos seguintes testes foi realizado durante, aproximadamente, 1h e o valor da temperatura ambiente foi registado de 15 em 15 minutos com o auxílio do sensor DHT22.

6.1.1 Distância entre Lepton 3.5 e superfície da água - 15.5 cm

Nos seguintes testes, o sistema *low-cost* IR ficou colocado no suporte da Figura 6.2. A distância entre a Lepton 3.5 e a superfície da água é de, aproximadamente, 15.5 cm em todos os testes.

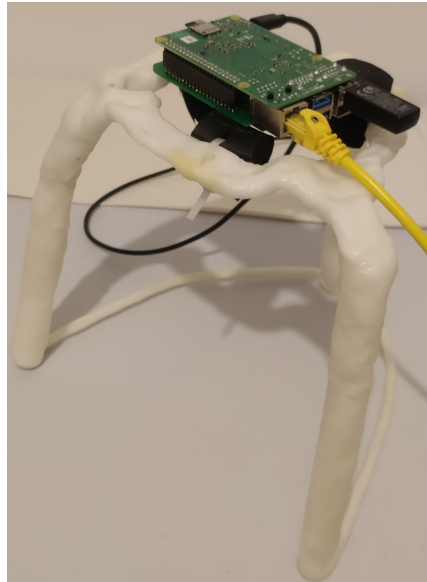


Figura 6.2: Suporte que permitiu colocar o sistema *low-cost* IR a uma distância de, aproximadamente, 15.5 cm da superfície da água.

Água à temperatura ambiente

Neste teste, a água que foi colocada na taça de vidro foi à temperatura ambiente. Como o sensor de temperatura submersível indica a temperatura média à volta da ponta de prova o recipiente com água foi colocado de modo a garantir que o centro do recipiente coincidissem com o centro da imagem, tal como se pode verificar na Figura 6.3.

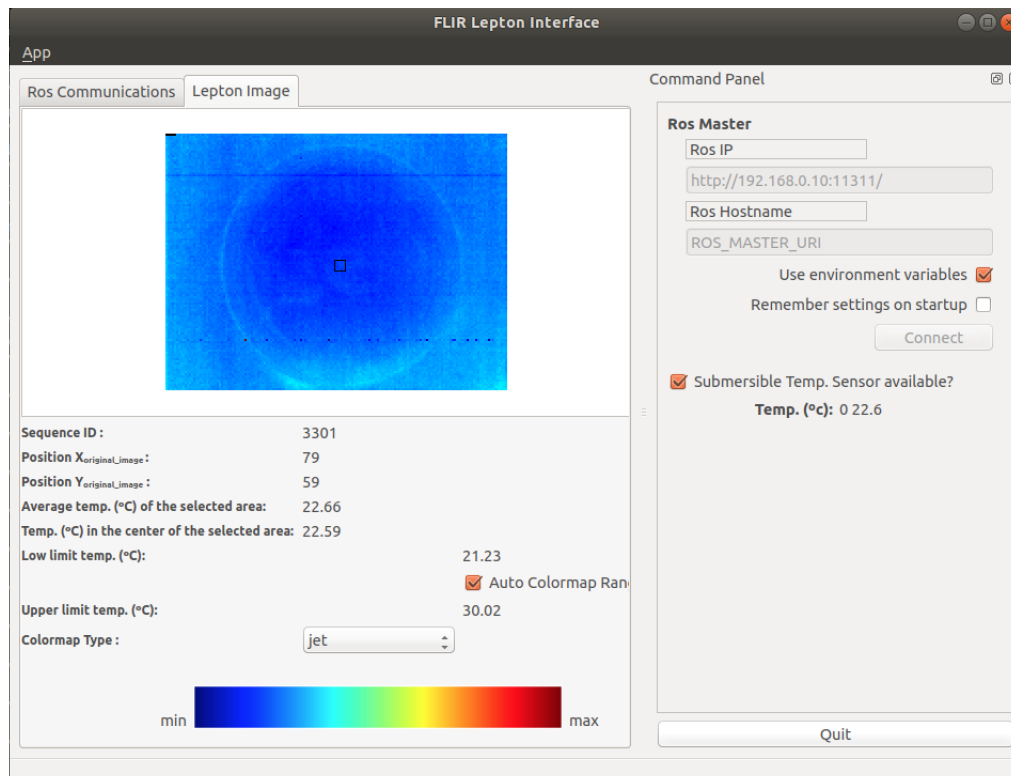


Figura 6.3: Imagem térmica da água à temperatura ambiente com o suporte a 15.5 cm.

Como se pode ver pela Figura 6.3 a temperatura da água, dada pelo sensor de temperatura submersível, no início do teste encontrava-se a, aproximadamente, 22.6°C. Depois de garantir que o centro do recipiente coincidia com o centro da imagem, foi criado um log de aproximadamente 1h para poder caracterizar a leitura de temperatura da Lepton 3.5 ao longo do tempo, quando se está a observar um alvo a uma distância fixa.

A temperatura da divisão onde foram feitos os testes foi retirada de 15 em 15 minutos para saber a tendência na variação de temperatura da água colocada no recipiente ao longo do log. Os valores obtidos estão na tabela 6.1.

A representação dessa variação de temperatura ao longo de 1h está demonstrada na Figura 6.4.

Na Figura 6.5 está representada a mediana, o valor máximo e mínimo e o número de *outliers* para o sensor CMOS Lepton 3.5 e sonda, respectivamente.

Da observação das Figuras 6.4 e 6.5, pode-se retirar as seguintes conclusões:

- No início do log, o valor de temperatura medido pelo sensor CMOS Lepton 3.5 e

Tabela 6.1: Registo de temperatura da divisão no teste com água à temperatura ambiente, a uma distância de 15.5 cm

Tempo (Minutos)	Temperatura (°C)
15	22.30
30	22.50
45	22.70
60	22.70

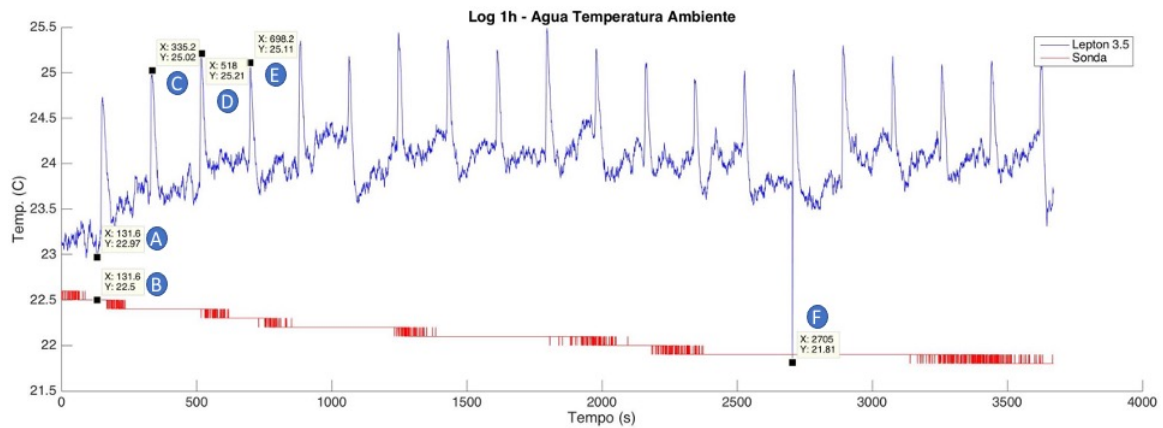


Figura 6.4: Evolução da medição de temperatura com água à temperatura ambiente a 15.5 cm durante 1h.

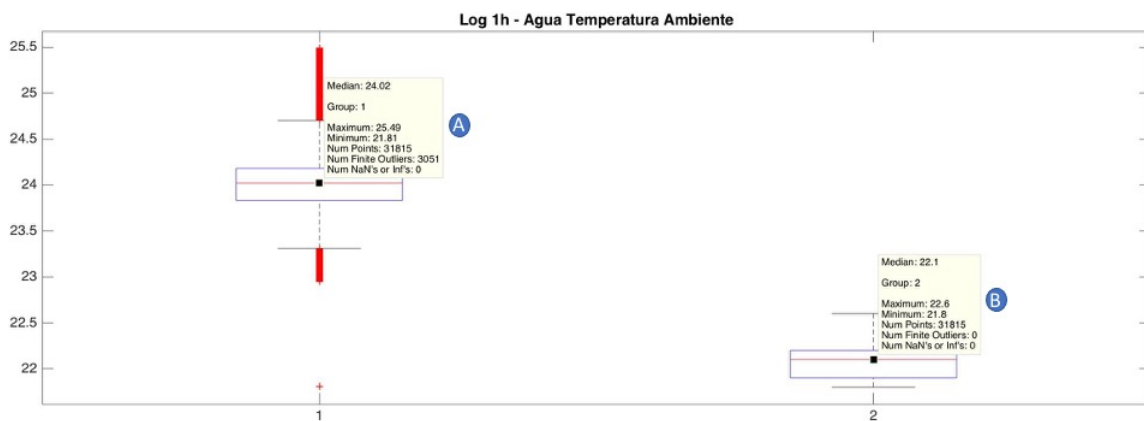


Figura 6.5: Boxplot obtido para o sensor CMOS Lepton 3.5 (1) e sonda (2), respetivamente, com água à temperatura ambiente a 15.5 cm durante 1h.

a sonda estavam muito próximos, ponto A e B da Figura 6.4, até ter ocorrido o

primeiro pico de medição do sensor CMOS Lepton3.5;

- Os picos nas medições de temperatura do sensor CMOS Lepton 3.5 ocorrem de 3 em 3 minutos (ponto C, D e E da Figura 6.4), aproximadamente, e devem-se a um parâmetro que está configurado com o valor recomendado pelo fabricante do sensor. Este parâmetro permite que o sensor efetue uma calibração interna, ao longo de todo o período de funcionamento do sensor, para que não se observe os efeitos descritos no capítulo 5.3.1. Caso contrário, no período de funcionamento do sensor este vai acumulando erro, em cada pixel da imagem, o que levará a medições incorrectas de temperatura e faz com que a imagem termográfica deixe de ser uniforme. Neste caso, o sistema *low-cost* IR será integrado num UAV onde poderá existir diferentes variações de temperatura de um momento para o outro, por isso, é necessário deixar este parâmetro configurável do sensor tal e qual como o fabricante recomenda, assim garante-se a uniformidade da imagem ao longo do tempo;
- Através da Figura 6.5 consegue-se perceber que o sensor CMOS lepton 3.5 tem uma diferença no valor da mediana de, aproximadamente, 1.92°C , em relação à mediana obtida para a sonda. O que faz com que o sensor esteja dentro dos parâmetros definidos pelo fabricante, porque quando o sensor se encontra configurado com o modo de radiometria activo e em modo: *High Gain*, significa que o erro de medição é de $\pm 5^{\circ}\text{C}$ (Tabela 5 no *datasheet* do fabricante) nestas condições;
- O ponto F da Figura 6.4 identifica um dos *outliers* e o valor mínimo lido pelo sensor CMOS Lepton 3.5;
- Por fim, com base na Figura 6.5, pode-se dizer que:
 - O valor máximo e mínimo lido pelo sensor CMOS Lepton 3.5 foi de 25.49°C e 21.81°C , respetivamente. Ponto A;
 - O valor máximo e mínimo lido pela sonda foi de 22.6°C e 21.8°C , respetivamente. Ponto B.

Água quente

Neste teste, a água que foi colocada na taça de vidro foi fervida. Tal como no teste anterior, o recipiente com água foi colocado de modo a garantir que o centro do recipiente coincidissem com o centro da imagem, tal como se pode verificar na Figura 6.6.

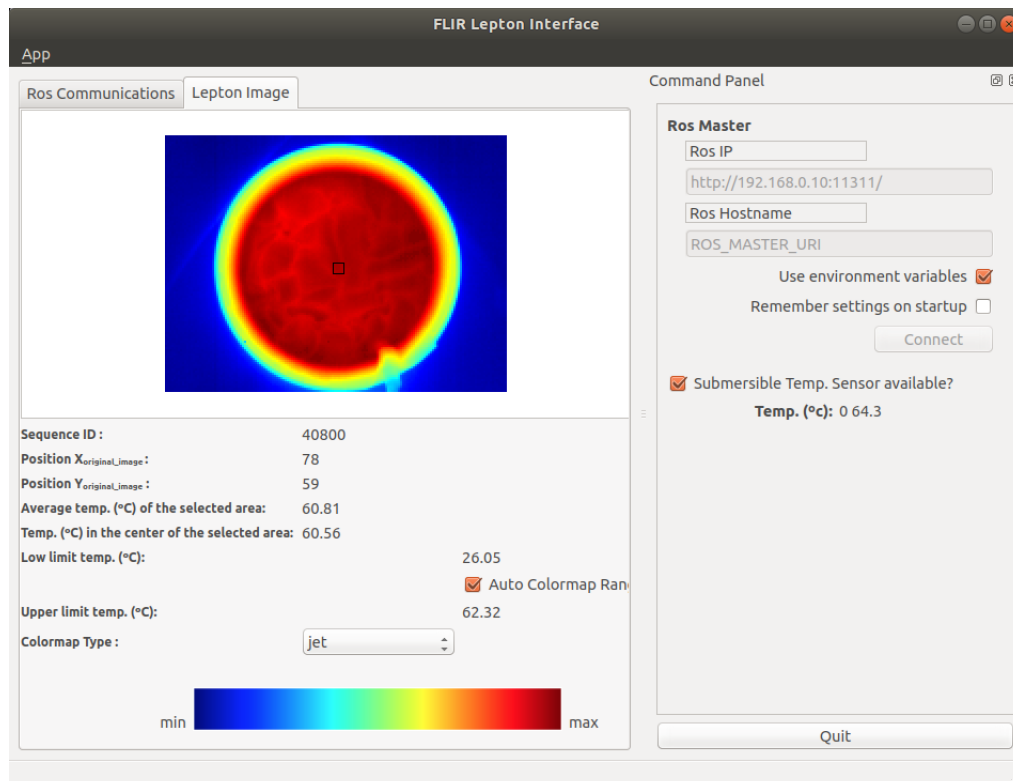


Figura 6.6: Imagem térmica da água quente com o suporte a 15.5 cm.

Como se pode ver na Figura 6.6 a temperatura da água, dada pelo sensor de temperatura submersível, no início do teste encontrava-se a, aproximadamente, 64.3°C. Depois foram repetidos os passos do teste anterior de maneira a obter um log de, aproximadamente, 1h para poder caracterizar a leitura de temperatura da Lepton 3.5 ao longo do tempo. Os valores de temperatura da divisão onde foram realizados os testes estão registados na tabela 6.2.

Tabela 6.2: Registo de temperatura da divisão no teste com água quente, a uma distância de 15.5 cm

Tempo (Minutos)	Temperatura (°C)
15	23.00
30	22.90
45	22.90
60	22.90

A representação dessa variação de temperatura ao longo de 1h está demonstrada na

Figura 6.7.

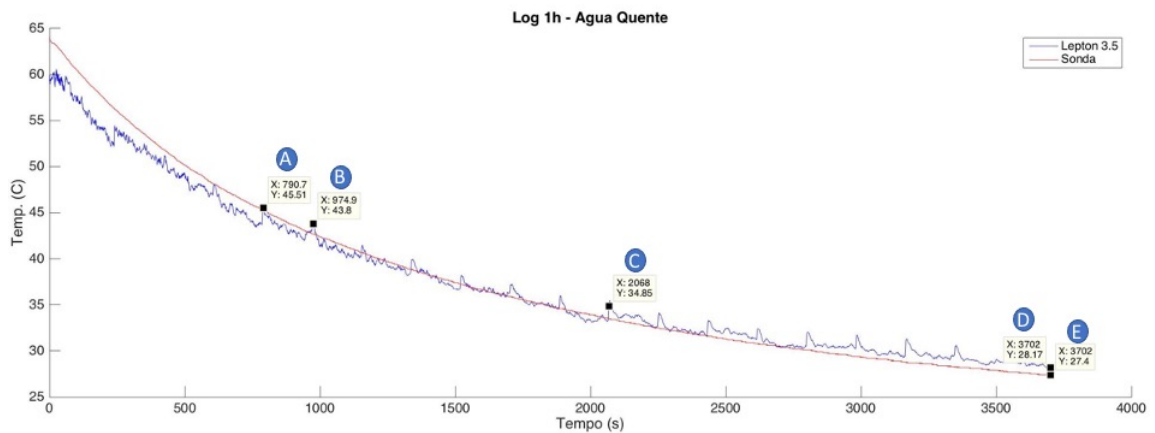


Figura 6.7: Evolução da medição de temperatura com água quente a 15.5 cm durante 1h.

Na Figura 6.8 está representada a mediana, o valor máximo e mínimo e o número de *outliers* para o sensor CMOS Lepton 3.5 e sonda, respectivamente.

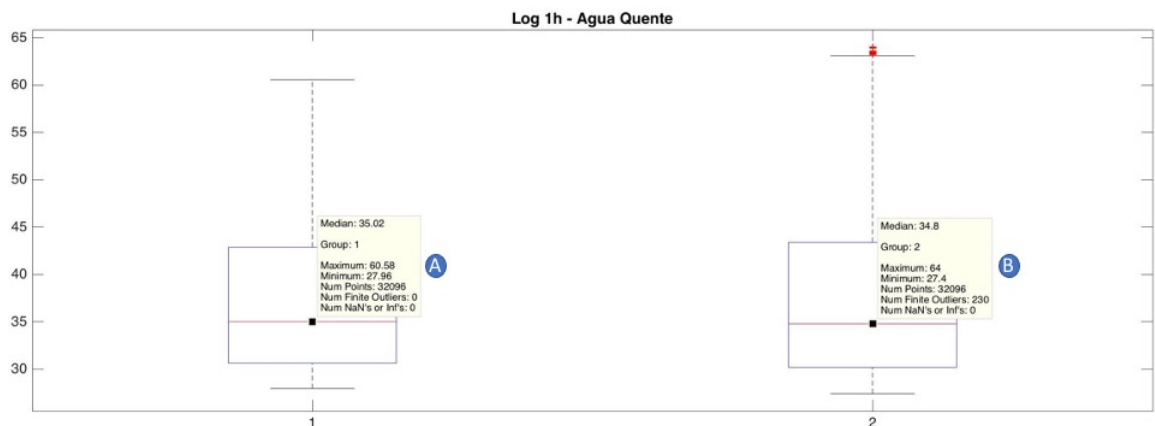


Figura 6.8: Boxplot obtido para o sensor CMOS Lepton 3.5 (1) e sonda (2), respectivamente, com água quente a 15.5 cm durante 1h.

Da observação das Figuras 6.7 e 6.8, pode-se retirar as seguintes conclusões:

- Durante todo este teste, os valores medidos por ambos os sensores foram sempre muito equivalentes. Só a partir do ponto C, aos 2068 s, Figura 6.7, é que os valores lidos pelo sensor CMOS Lepton 3.5 começaram a ser um pouco superiores aos

obtidos pela sonda;

- O ponto A e B da Figura 6.7, identificam um dos momentos em que o sensor CMOS Lepton 3.5 efetua a sua calibração interna mas, neste teste, os valores que começaram a ser obtidos depois dessa calibração não foram tão dispares como no teste anterior, onde a água estava à temperatura ambiente. Isso deve-se ao facto de, neste teste, existir uma maior variação no range de temperaturas da divisão onde foram realizados os testes, pois temos uma temperatura média da divisão de 22.93°C , tabela 6.2, e uma temperatura máxima da água, lida pela sonda, de 64°C ;
- Através da Figura 6.8 consegue-se perceber que o sensor CMOS lepton 3.5 tem uma diferença no valor da mediana de, aproximadamente, 0.94°C , em relação à mediana obtida para a sonda. O que mais uma vez comprava que o sensor está dentro daquilo que o fabricante anuncia, $\pm 3^{\circ}\text{C}$ (Tabela 5 no *datasheet* do fabricante) nestas condições;
- Os pontos D e E, Figura 6.7, confirmam que a temperatura da água iria acabar por convergir para o valor da temperatura ambiente (Temperatura média de 22.93°C), caso o log continuasse;
- Pelos pontos A e B da Figura 6.8 pode-se verificar que:
 - O valor máximo e mínimo lido pelo sensor CMOS Lepton 3.5 foi de 60.58°C e 27.96°C , respetivamente. Ponto A;
 - O valor máximo e mínimo lido pela sonda foi de 64°C e 27.4°C , respetivamente. Ponto B.

Água fria

Neste teste, a água que foi colocada na taça de vidro foi fria. Tal como nos testes anteriores, o recipiente com água foi colocado de modo a garantir que o centro do recipiente coincidissem com o centro da imagem, tal como se pode verificar na Figura 6.9.

Como se pode ver pela Figura 6.9 a temperatura da água, dada pelo sensor de temperatura submersível, no início do teste encontrava-se a, aproximadamente, 8.2°C . Depois foram repetidos os passos dos testes anteriores de maneira a obter um log de, aproximadamente, 1h para poder caracterizar a leitura de temperatura da Lepton 3.5 ao longo do tempo. Os valores de temperatura da divisão onde foram realizados os testes estão registados na tabela 6.3.

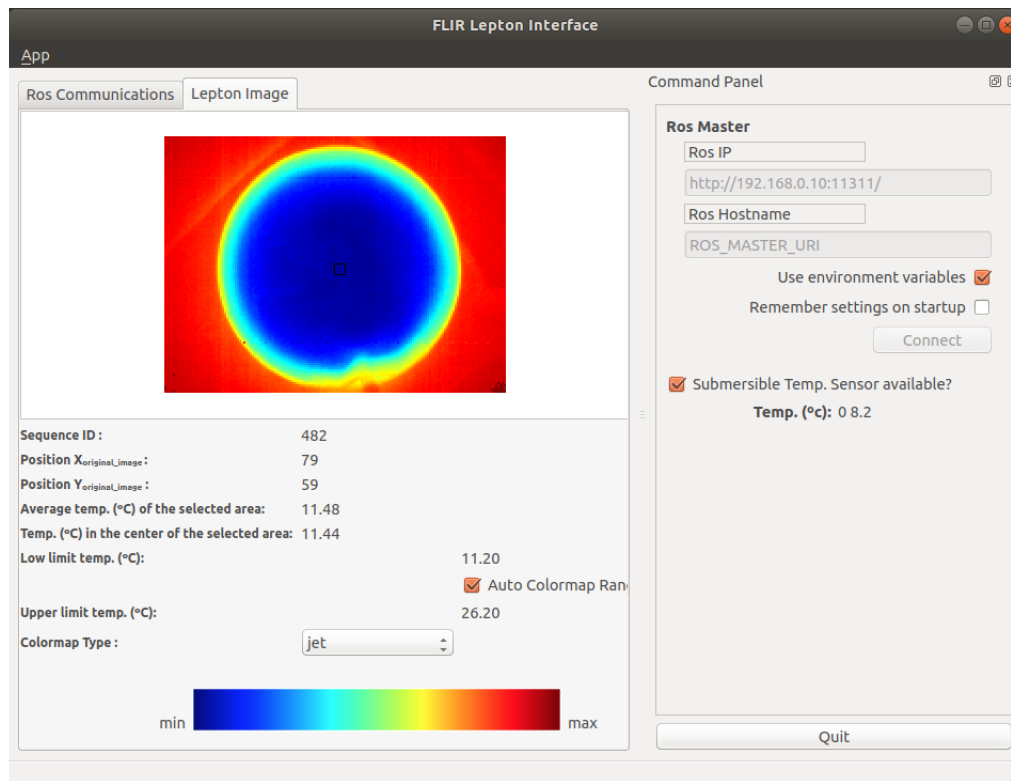


Figura 6.9: Imagem térmica da água fria com o suporte a 15.5 cm.

Tabela 6.3: Registo de temperatura da divisão no teste com água fria, a uma distância de 15.5 cm

Tempo (Minutos)	Temperatura (°C)
15	22.40
30	22.30
45	22.20
60	22.10

A representação dessa variação de temperatura ao longo de 1h está demonstrada na Figura 6.10.

Na Figura 6.11 está representada a mediana e o valor máximo e mínimo para o sensor CMOS Lepton 3.5 e sonda, respectivamente.

Da observação das Figuras 6.10 e 6.11, pode-se retirar as seguintes conclusões:

- O ponto A e B da Figura 6.10, identificam um dos momentos em que o sensor CMOS Lepton 3.5 efetua a sua calibração interna. Os valores que começaram a

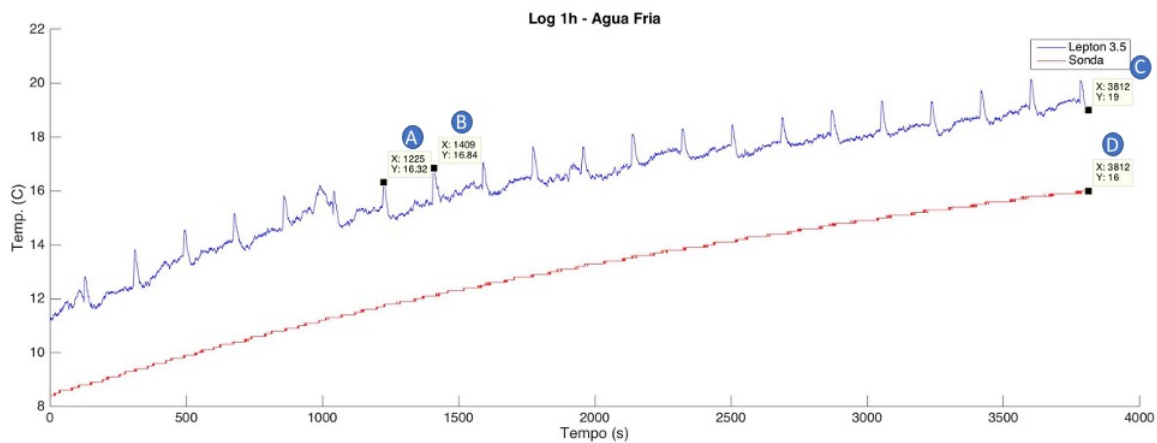


Figura 6.10: Evolução da medição de temperatura com água fria a 15.5 cm durante 1h.

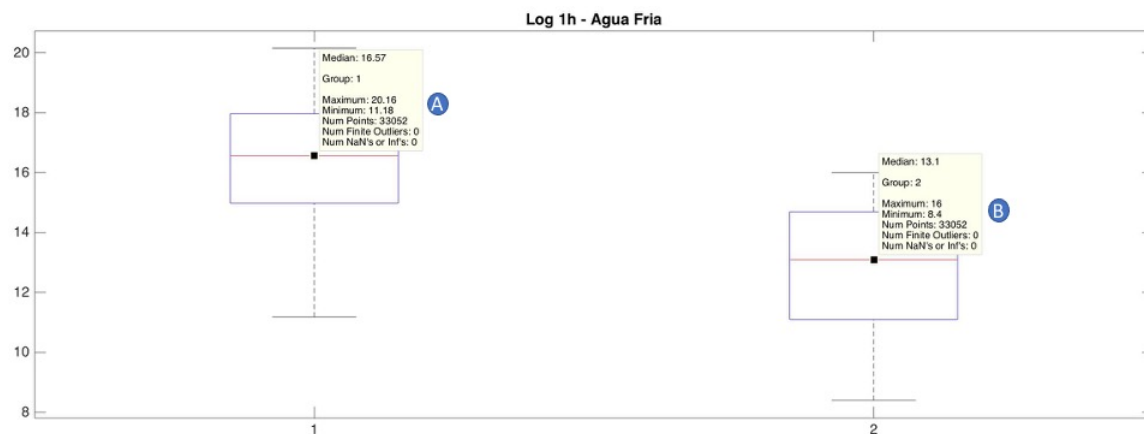


Figura 6.11: Boxplot obtido para o sensor CMOS Lepton 3.5 (1) e sonda (2), respetivamente, com água fria a 15.5 cm durante 1h.

ser obtidos depois dessa calibração não foram tão dispares como no teste com a água à temperatura ambiente. Isso deve-se ao facto de, neste teste, existir uma maior variação no range de temperaturas da divisão onde foram realizados os testes, pois temos uma temperatura média da divisão de 22.25°C , tabela 6.3, e uma temperatura máxima da água, lida pela sonda, de 16°C ;

- Através da Figura 6.11 consegue-se perceber que o sensor CMOS lepton 3.5 tem uma diferença no valor da mediana de, aproximadamente, 3.47°C , em relação à mediana obtida para a sonda. O que mais uma vez comprava que o sensor está den-

tro daquilo que o fabricante anuncia, $\pm 5^{\circ}\text{C}$ (Tabela 5 no *datasheet* do fabricante) nestas condições;

- Os pontos C e D, Figura 6.10, confirmam que a temperatura da água iria acabar por convergir para o valor da temperatura ambiente (Temperatura média de 22.25°C), caso o log continuasse;
- Pelos pontos A e B da Figura 6.11 pode-se verificar que:
 - O valor máximo e mínimo lido pelo sensor CMOS Lepton 3.5 foi de 20.16°C e 11.18°C , respetivamente. Ponto A;
 - O valor máximo e mínimo lido pela sonda foi de 16°C e 8.4°C , respetivamente. Ponto B.

6.1.2 Distância entre Lepton 3.5 e superfície da água - 33.5 cm

Nestes testes, o sistema *low-cost* IR ficou colocado no suporte da Figura 6.12. A distância entre a Lepton 3.5 e a superfície da água é de, aproximadamente, 33.5 cm para todos os testes.

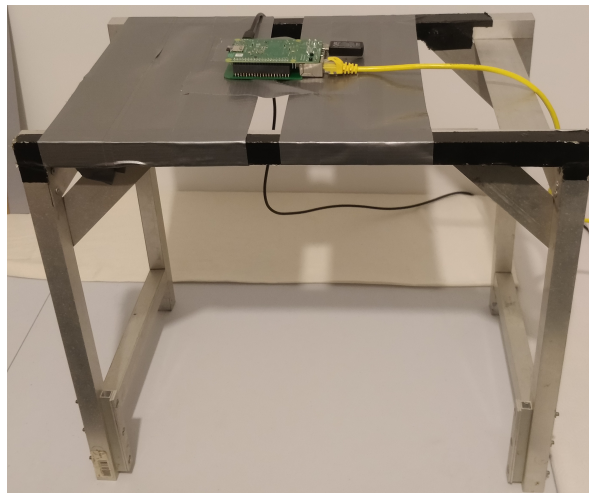


Figura 6.12: Suporte que permitiu colocar o sistema *low-cost* IR a uma distância de, aproximadamente, 33.5 cm da superfície da água.

Água à temperatura ambiente

Neste teste, a água que foi colocada na taça de vidro foi à temperatura ambiente. Tal como nos testes anteriores, o recipiente com água foi colocado de modo a garantir que o centro do recipiente coincidissem com o centro da imagem, tal como se pode verificar na Figura 6.13.

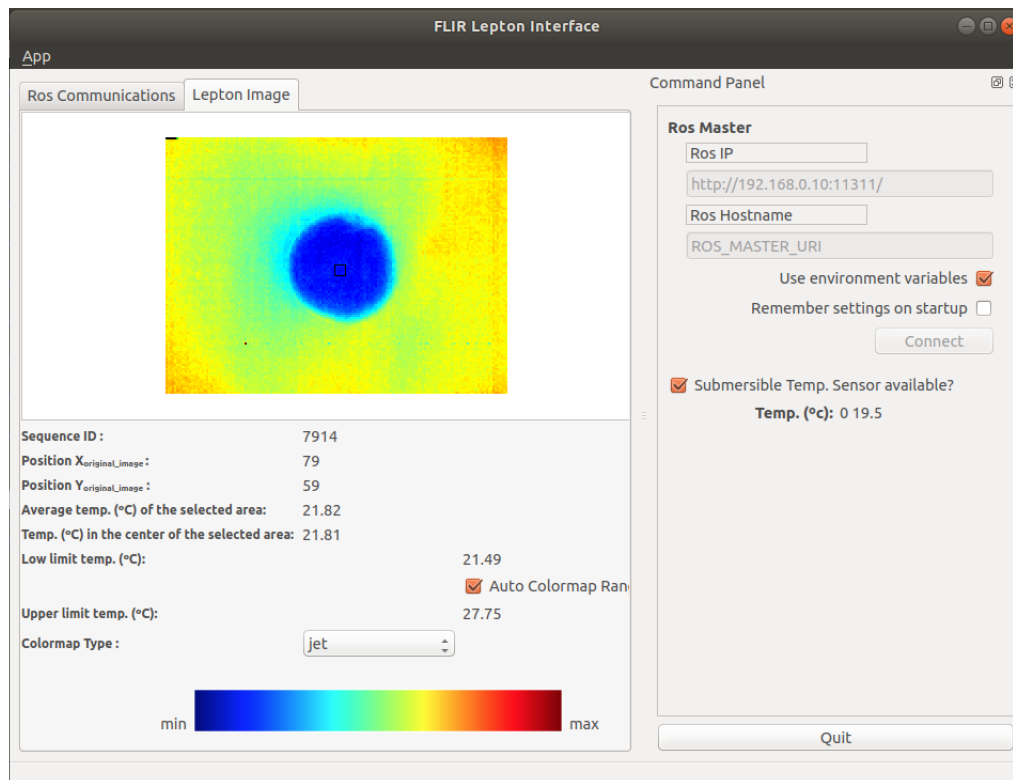


Figura 6.13: Imagem térmica da água à temperatura ambiente com o suporte a 33.5 cm.

Como se pode ver pela Figura 6.13 a temperatura da água utilizada, dada pelo sensor de temperatura submersível, no início do teste encontrava-se a, aproximadamente, 19.5°C. Depois foram repetidos os passos dos testes anteriores de maneira a obter um log de, aproximadamente, 1h para poder caracterizar a leitura de temperatura da Lepton 3.5 ao longo do tempo. Os valores de temperatura da divisão onde foram realizados os testes estão registados na tabela 6.4.

A representação dessa variação de temperatura ao longo de 1h está demonstrada na Figura 6.14.

Na Figura 6.15 está representada a mediana, o valor máximo e mínimo e o número

Tabela 6.4: Registo de temperatura da divisão no teste com água à temperatura ambiente, a uma distância de 33.5 cm

Tempo (Minutos)	Temperatura (°C)
15	22.50
30	22.40
45	22.40
60	22.40

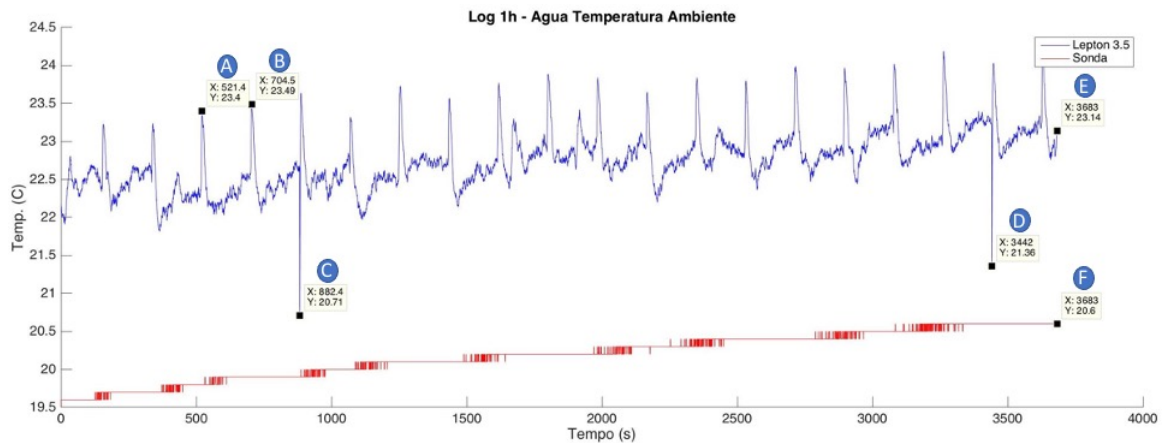


Figura 6.14: Evolução da medição de temperatura com água à temperatura ambiente a 33.5 cm durante 1h.

de *outliers* para o sensor CMOS Lepton 3.5 e sonda, respectivamente.

Da observação das Figuras 6.14 e 6.15, pode-se retirar as seguintes conclusões:

- O ponto A e B da Figura 6.14, identificam um dos momentos em que o sensor CMOS Lepton 3.5 efetua a sua calibração interna. Depois dessa calibração, o sensor CMOS começa por obter valores de temperatura mais elevados do que seria de esperar, depois volta a ter medições mais constantes até à próxima calibração interna;
- Através da Figura 6.15 consegue-se perceber que o sensor CMOS lepton 3.5 tem uma diferença no valor da mediana de, aproximadamente, 2.53°C , em relação à mediana obtida para a sonda. O que mais uma vez comprava que o sensor está dentro daquilo que o fabricante anuncia, $\pm 5^{\circ}\text{C}$ (Tabela 5 no *datasheet* do fabricante) nestas condições;
- No teste em que a distância do sensor CMOS Lepton 3.5 à superfície da água é

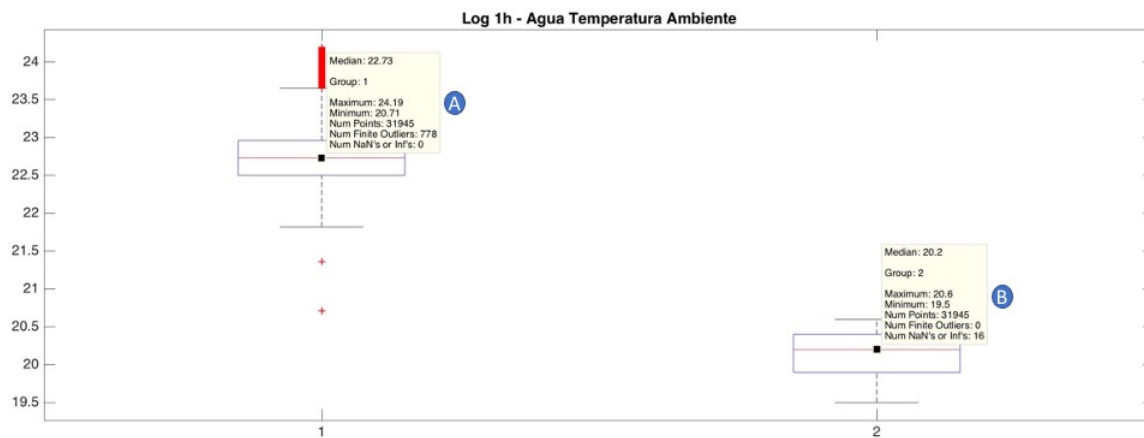


Figura 6.15: Boxplot obtido para o sensor CMOS Lepton 3.5 (1) e sonda (2), respectivamente, com água à temperatura ambiente a 33.5 cm durante 1h.

de, aproximadamente, 15.5 cm e a água também está à temperatura ambiente, o valor da diferença entre ambas as medianas era de, aproximadamente, 1.92°C . Comparando com o valor obtido neste teste, verifica-se que é mais elevado, $+0.61^{\circ}\text{C}$ de diferença. O que quer dizer que apesar da diferença de distâncias, em ambos os testes, do sensor CMOS e a superfície da água não ser muita, aproximadamente 18 cm, já se consegue perceber que quanto maior for a distância ao alvo a medir, maior vai ser o erro na medição da temperatura;

- Os pontos C e D, Figura 6.14, são dois do 3051 *outliers* deste log;
- Os pontos E e F, Figura 6.14, confirmam que a temperatura da água iria acabar por convergir para o valor da temperatura ambiente (Temperatura média de 22.43°C), caso o log continuasse;
- Pelos pontos A e B da Figura 6.15 pode-se verificar que:
 - O valor máximo e mínimo lido pelo sensor CMOS Lepton 3.5 foi de 24.19°C e 20.71°C , respetivamente. Ponto A;
 - O valor máximo e mínimo lido pela sonda foi de 20.6°C e 19.5°C , respetivamente. Ponto B.

Água quente

Neste teste, a água que foi colocada na taça de vidro foi fervida. Tal como nos testes anteriores, o recipiente com água foi colocado de modo a garantir que o centro do recipiente coincidissem com o centro da imagem, tal como se pode verificar na Figura 6.16.

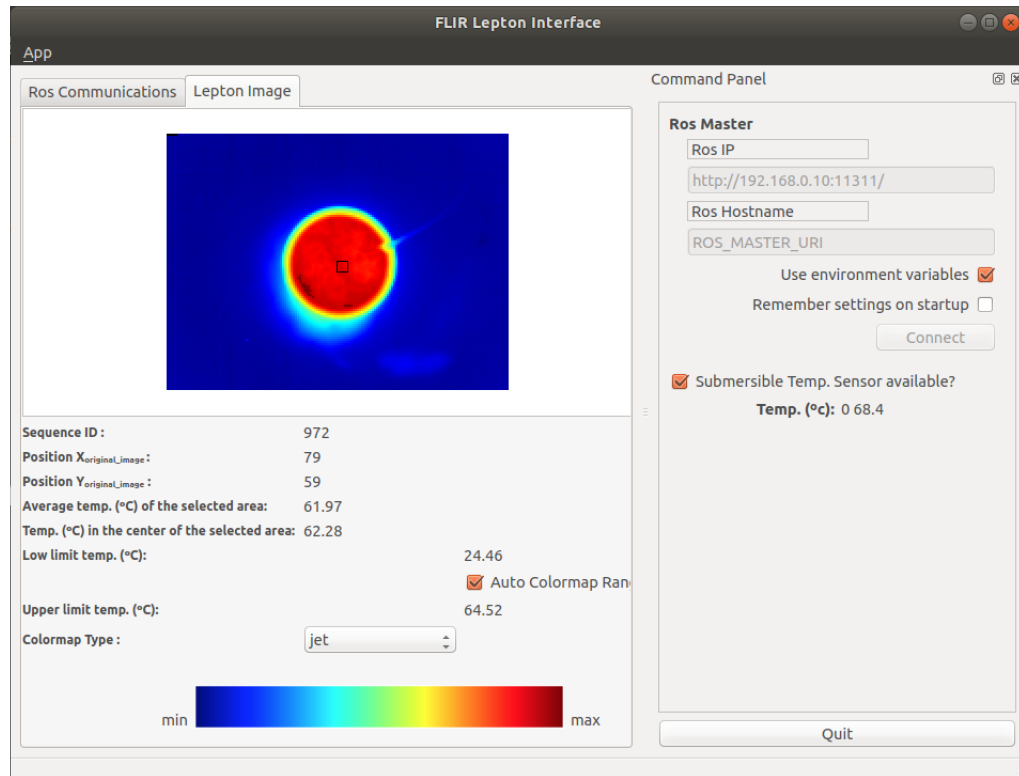


Figura 6.16: Imagem térmica da água quente com o suporte a 33.5 cm.

Como se pode ver pela Figura 6.16 a temperatura da água utilizada, dada pelo sensor de temperatura submersível, no início do teste encontrava-se a, aproximadamente, 68,4°C. Depois foram repetidos os passos dos testes anteriores de maneira a obter um log de, aproximadamente, 1h para poder caracterizar a leitura de temperatura da Lepton 3.5 ao longo do tempo. Os valores de temperatura da divisão onde foram realizados os testes estão registados na tabela 6.5.

A representação dessa variação de temperatura ao longo de 1h está demonstrada na Figura 6.17.

Na Figura 6.18 está representada a mediana, o valor máximo e mínimo e o número de *outliers* para o sensor CMOS Lepton 3.5 e sonda, respectivamente.

Tabela 6.5: Registo de temperatura da divisão no teste com água quente, a uma distância de 33.5 cm

Tempo (Minutos)	Temperatura (°C)
15	22.60
30	22.40
45	22.30
60	22.40

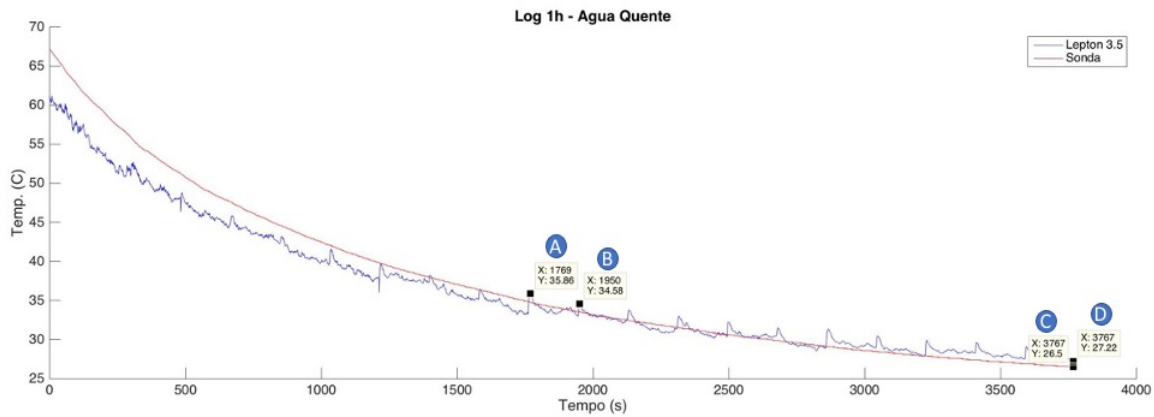


Figura 6.17: Evolução da medição de temperatura com água quente a 33.5 cm durante 1h.

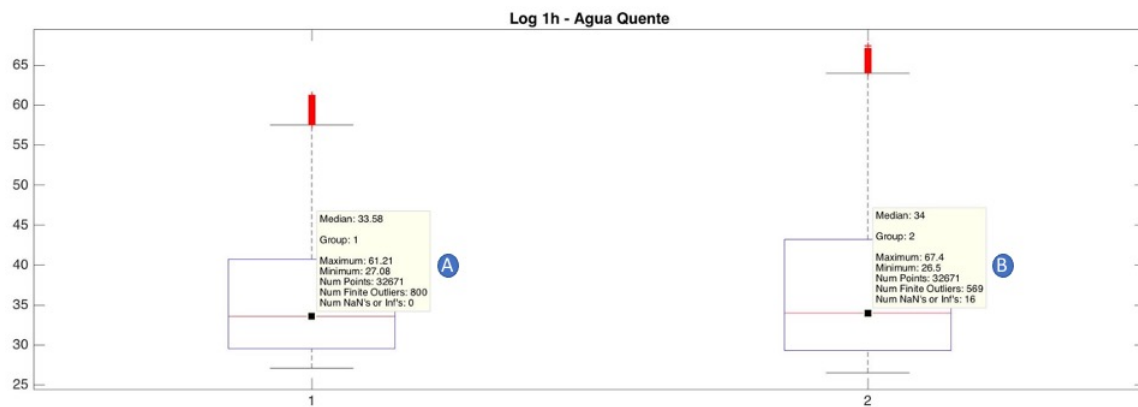


Figura 6.18: Boxplot obtido para o sensor CMOS Lepton 3.5 (1) e sonda (2), respetivamente, com água quente a 33.5 cm durante 1h.

Da observação das Figuras 6.17 e 6.18, pode-se retirar as seguintes conclusões:

- Durante todo este teste, os valores medidos por ambos os sensores foram sempre muito equivalentes;
- O ponto A e B da Figura 6.17, identificam um dos momentos em que o sensor CMOS Lepton 3.5 efetua a sua calibração interna mas, neste teste, os valores que começaram a ser obtidos depois dessa calibração são sempre muito próximos do valor da sonda. Isso deve-se ao facto de, neste teste, existir uma maior variação no range de temperaturas da divisão onde foram realizados os testes, pois temos uma temperatura média da divisão de 22.43°C , tabela 6.5, e uma temperatura máxima da água, lida pela sonda, de 67.4°C ;
- Através da Figura 6.18 consegue-se perceber que o sensor CMOS lepton 3.5 tem uma diferença no valor da mediana de, aproximadamente, 0.42°C , em relação à mediana obtida para a sonda. O que mais uma vez comprava que o sensor está dentro daquilo que o fabricante anuncia, $\pm 3^{\circ}\text{C}$ (Tabela 5 no *datasheet* do fabricante) nestas condições;
- Os pontos C e D, Figura 6.17, confirmam que a temperatura da água iria acabar por convergir para o valor da temperatura ambiente (Temperatura média de 22.43°C), caso o log continuasse;
- Pelos pontos A e B da Figura 6.18 pode-se verificar que:
 - O valor máximo e mínimo lido pelo sensor CMOS Lepton 3.5 foi de 61.21°C e 27.08°C , respetivamente. Ponto A;
 - O valor máximo e mínimo lido pela sonda foi de 67.4°C e 26.5°C , respetivamente. Ponto B.

Água fria

Neste teste, a água que foi colocada na taça de vidro foi fria. Tal como nos testes anteriores, o recipiente com água foi colocado de modo a garantir que o centro do recipiente coincidissem com o centro da imagem, tal como se pode verificar na Figura 6.19.

Como se pode ver pela Figura 6.19 a temperatura da água utilizada, dada pelo sensor de temperatura submersível, no início do teste encontrava-se a, aproximadamente, 9.3°C . Depois foram repetidos os passos dos testes anteriores de maneira a obter um log de, aproximadamente, 1h para poder caracterizar a leitura de temperatura da Lepton 3.5 ao longo do tempo. Os valores de temperatura da divisão onde foram realizados os testes estão registados na tabela 6.6.

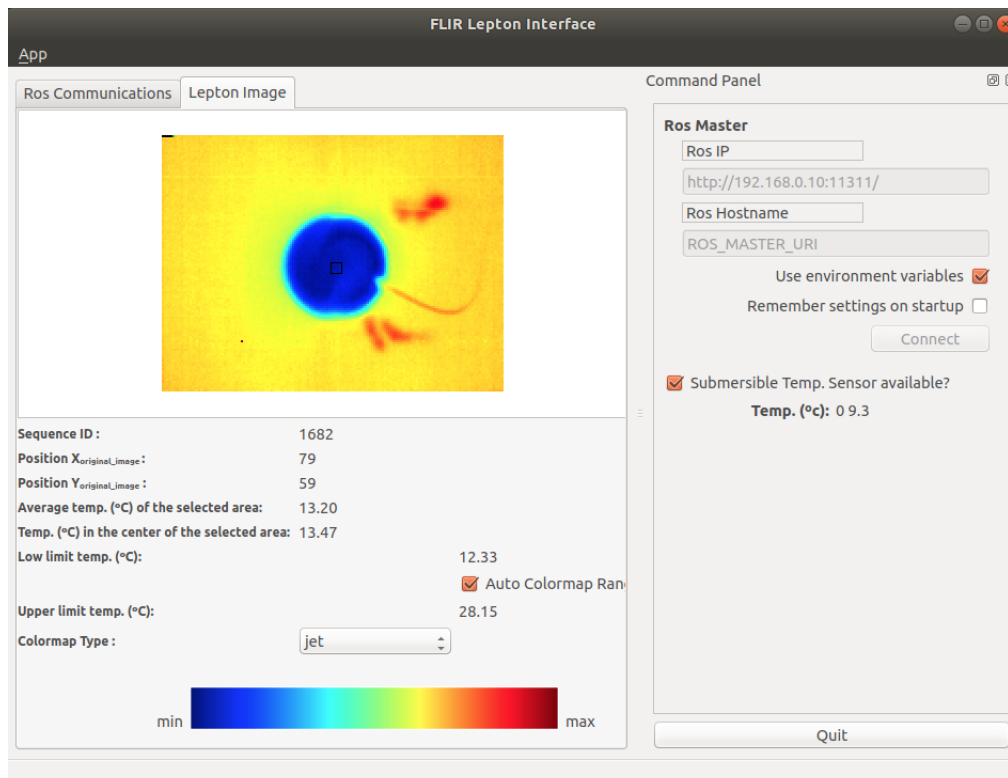


Figura 6.19: Imagem térmica da água fria com o suporte a 33.5 cm.

Tabela 6.6: Registo de temperatura da divisão no teste com água fria, a uma distância de 33.5 cm

Tempo (Minutos)	Temperatura (°C)
15	21.20
30	21.00
45	20.90
60	21.10

A representação dessa variação de temperatura ao longo de 1h está demonstrada na Figura 6.20.

Na Figura 6.21 está representada a mediana, o valor máximo e mínimo e o número de *outliers* para o sensor CMOS Lepton 3.5 e sonda, respectivamente.

Da observação das Figuras 6.20 e 6.21, pode-se retirar as seguintes conclusões:

- O ponto A e B da Figura 6.20, identificam um dos momentos em que o sensor CMOS Lepton 3.5 efetua a sua calibração interna. Os valores que começaram a

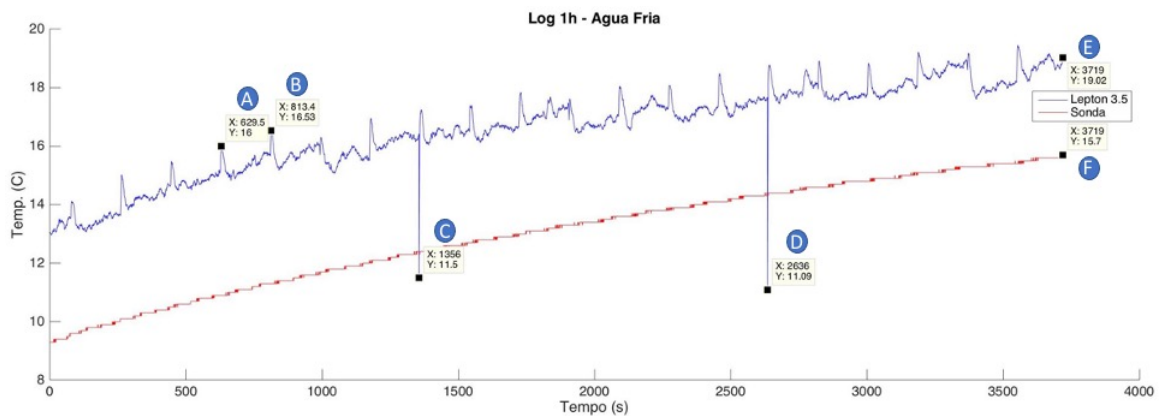


Figura 6.20: Evolução da medição de temperatura com água fria a 33.5 cm durante 1h.

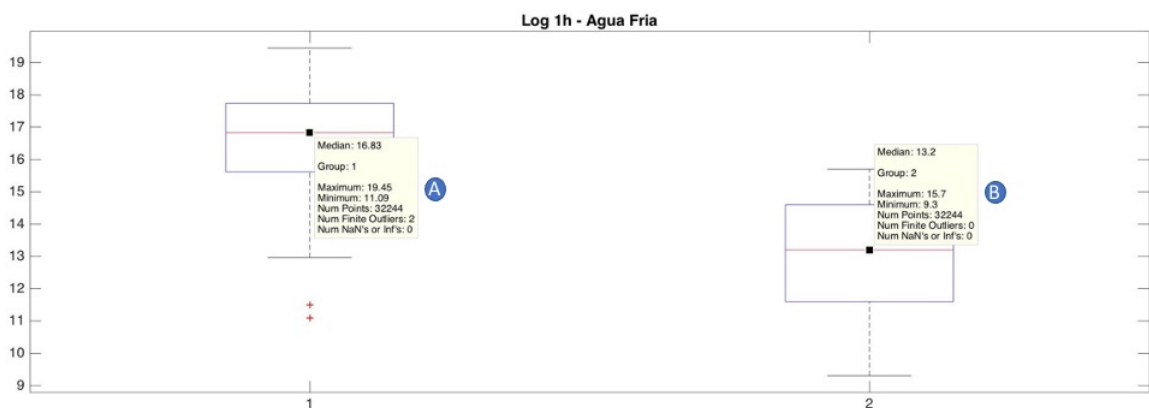


Figura 6.21: Boxplot obtido para o sensor CMOS Lepton 3.5 (1) e sonda (2), respetivamente, com água fria a 33.5 cm durante 1h.

ser obtidos depois dessa calibração não foram tão dispares como no teste com a água à temperatura ambiente. Isso deve-se ao facto de, neste teste, existir uma maior variação no range de temperaturas da divisão onde foram realizados os testes, pois temos uma temperatura média da divisão de 21.05°C , tabela 6.6, e uma temperatura máxima da água, lida pela sonda, de 15.7°C ;

- Os pontos C e D representam dois dos *outliers* deste log ao logo de cerca de 1h;
- Através da Figura 6.21 consegue-se perceber que o sensor CMOS lepton 3.5 tem uma diferença no valor da mediana de, aproximadamente, 3.63°C , em relação à mediana obtida para a sonda. O que mais uma vez comprava que o sensor está den-

tro daquilo que o fabricante anuncia, $\pm 5^{\circ}\text{C}$ (Tabela 5 no *datasheet* do fabricante) nestas condições;

- Os pontos E e F, Figura 6.20, confirmam que a temperatura da água iria acabar por convergir para o valor da temperatura ambiente (Temperatura média de 21.05°C), caso o log continuasse;
- Pelos pontos A e B da Figura 6.21 pode-se verificar que:
 - O valor máximo e mínimo lido pelo sensor CMOS Lepton 3.5 foi de 19.45°C e 11.09°C , respetivamente. Ponto A;
 - O valor máximo e mínimo lido pela sonda foi de 15.7°C e 9.3°C , respetivamente. Ponto B.

6.2 Integração do sistema *low-cost* IR no veículo autónomo aéreo

Depois de realizados todos os testes de laboratório, integrou-se o sistema *low-cost* IR com um dos veículos autónomo aéreo do laboratório, o STORK, Figura 6.22.

Tendo em conta que o robô utilizado usa a framework ROS, a integração do sistema *low-cost* IR foi exequível, porque a única alteração necessária foi o IP da *Raspberry Pi*. Todos os sensores ligados ao UAV estão na gama de IP's: 192.168.1.X, por isso, foi necessário mudar o IP previamente configurado para: 192.168.1.30.

O UAV utilizado neste teste já tem integrado uma câmara IR, Teledyne Dalsa Calibir GX com lente M25, e será usada durante todo o teste para uma análise comparativa.

As principais características das câmaras IR utilizadas são as que apresentadas na tabela 6.7. As características da lente acoplada à câmara estão na tabela 6.8.

Tabela 6.7: Tabela com as principais características das câmaras IR utilizadas nos testes *outdoor*

	Array format	Thermal sensitivity	Frame Rate	FOV/HFOV
Lepton 3.5	160 x 120 bytes	< 50 mK	8.7 Hz	HFOV: 57°
Teledyne Dalsa Calibir GX	640 x 480 bytes	≤ 50 mK	30/60 Hz	FOV: Lens dependent

Com o sistema *low-cost* IR instalado no UAV foi medido o seu consumo energético porque este é um dos pontos a ter em conta quando se integra um sistema num robô, especialmente num veículo aéreo em que um alto consumo energético pode significar



(a) UAV STORK.

(b) STORK com sistema *low-cost IR* (em cima), TELEDYNE Dalsa Calibri GX (em baixo do sistema *low-cost IR*) e uma câmara visível (à direita).Figura 6.22: Imagens do STORK com o sistema *low-cost IR* integrado.

menos horas de voo. E o consumo energético do sistema *low-cost IR* depois de inicializado o nó de aquisição na *Raspberry Pi* é de, aproximadamente, 700 mA.

O voo de teste foi realizado dentro do ISEP e as intenções do voo eram: integrar o sistema *low-cost IR* no UAV e comparar as leituras de temperatura obtidas com o CMOS

Tabela 6.8: Tabela com as características da lente usada pela Teledyne Dalsa Calibir GX

Model Part Numbers	Lens Mount	Aperture (1/f)	HFOV	VFOV	Lens Weight
IR-GMZG-4105000	M25	1.14	16.9°	12.9°	45.9g

Lepton 3.5 e a Teledyne DALSA Calibir GX. Tendo em conta que estamos a comparar sensores completamente diferentes, a Lepton 3.5 é um sensor CMOS sem qualquer tipo de lente acoplada e a DALSA tem acoplada a lente M25, tabela 6.8, torna mais difícil uma comparação direta com a Lepton 3.5, pois isso irá influenciar diretamente a leitura de temperatura de cada uma das câmaras.

De seguida apresentam-se alguns resultados obtidos durante o voo realizado, em pós-processamento. De realçar que o *color map* utilizado foi o da Figura 6.23.

Figura 6.23: Tipo de *color map* utilizado para visualização do log de voo.

Por ser um dos *color maps* que apresenta uma maior variedade de cores, consegue-se representar mais facilmente as diferentes variações de temperatura em cada pixel das imagens tornando a sua visualização mais fácil para se detetar, por exemplo, algum *hot spot*. Neste *colormap*, o valor mínimo de temperatura será pintado com o azul mais à esquerda e o valor máximo de temperatura com o vermelho mais à direita.

Na Figura 6.24 é possível perceber que o CMOS Lepton 3.5 tem um maior FOV que a câmara Teledyne Dalsa, mas isso já era esperado porque a câmara Teledyne Dalsa usa uma lente que só lhe permite ter um HFOV de 16.9° e um VFOV de 12.9°, tabela 6.8. O que para determinados cenários de aplicação pode ser bom, como por exemplo, medição de temperatura corporal, mas se o UAV precisar de detetar, por exemplo, o número de *hot spots* de uma determinada área de busca, com o CMOS Lepton 3.5 isso poderá ser feito mais rapidamente, pois tem um HFOV de 57°. Na mesma Figura 6.24, ao compararmos os valores de temperatura obtidos, da área selecionada pelos quadrados pretos, reparamos que existe uma diferença de temperatura, nas leituras obtidas, de aproximadamente 5.6°. E isso pode-se explicar, principalmente, pela influência de dois fatores descritos anteriormente nos capítulos 3.1.3 e 3.1.5. Tendo em conta que no dia do voo estava sol, essa radiação solar que incidiu diretamente sobre o CMOS Lepton 3.5 e a Teledyne Dalsa influenciou a medição de temperatura dos alvos pretendidos (na imagem da câmara visível consegue-se observar esse acontecimento), ou seja, para se

obter uma temperatura mais exacta dos alvos teríamos de ter mais imagens térmicas de diversos ângulos. O segundo fator, resolução, também tem bastante influência na medição radiométrica de um alvo, isto porque o CMOS Lepton 3.5 tem uma resolução de 160 x 120 pixels e a Teledyne Dalsa 640 x 480 pixels, além disso, tem uma lente acoplada que lhe permite estar mais próxima do alvo, e isso influencia o valor de temperatura pois irá ter um maior número de pixels para descrever esse alvo.

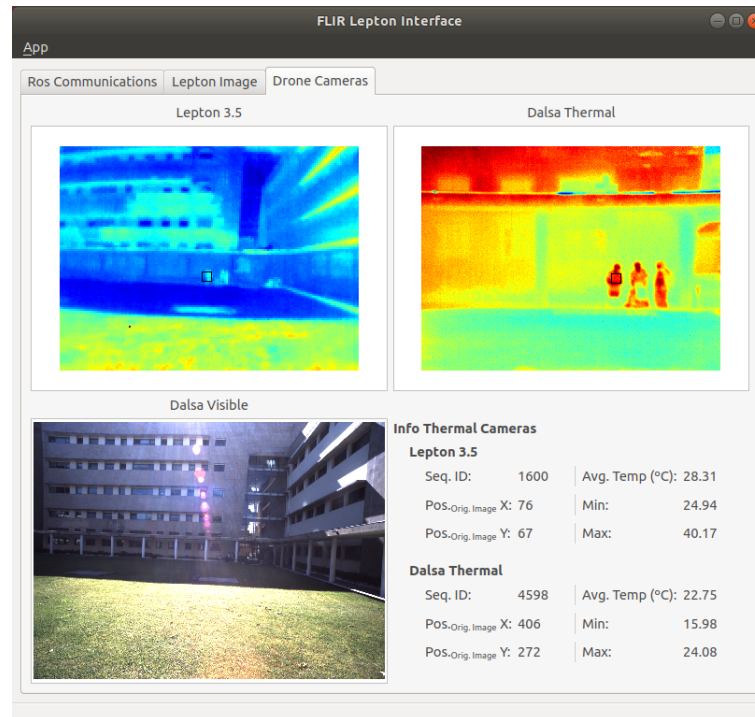


Figura 6.24: Imagem obtida durante o voo - Parte 1.

Na Figura 6.25 a diferença de, aproximadamente, 17°C deve-se principalmente pelo facto do CMOS Lepton 3.5 ter um FOV maior do que a Teledyne Dalsa, porque pela imagem da câmara visível consegue-se perceber que temos diferentes superfícies a refletir a radiação solar (Dois edifícios com diferentes materiais de construção, carros com diferentes cores, relva, etc.). Como a Teledyne Dalsa tem um FOV menor, acaba por ter menos influência das reflexões das superfícies mencionadas anteriormente e ter um valor de temperatura média do alvo mais baixa. A diferente resolução dos dois sensores, continua a ser um fator preponderante quando se pretende fazer medições radiométricas a um determinado alvo.

Na Figura 6.26 a diferença de, aproximadamente, 17.6°C deve-se aos mesmo fatores

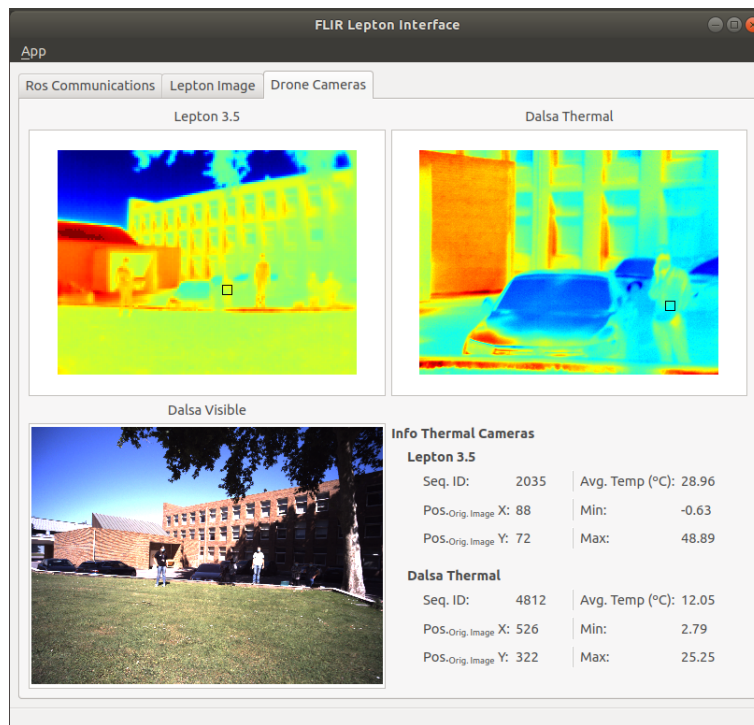


Figura 6.25: Imagem obtida durante o voo - Parte 2.

da Figura 6.25, FOV e resolução.

Na Figura 6.27 o UAV já tinha terminado o voo e ambos os sensores estavam a apontar para o alvo, naquela zona em que podemos ter reflexões da própria câmara e resultar em medições imprecisas. Fenómeno explicado no capítulo 3.1.3. E daí, poder-se explicar a diferença de, aproximadamente, 9.2°C entre os dois sensores, onde o valor da câmara Teledyne Dalsa se encontra um pouco abaixo daquilo que seria de esperar como temperatura corporal média.

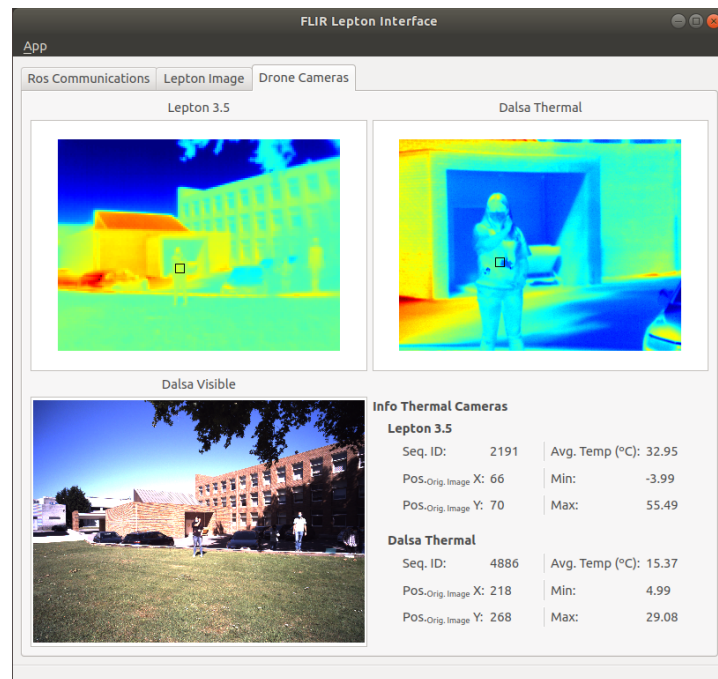


Figura 6.26: Imagem obtida durante o voo - Parte 3.

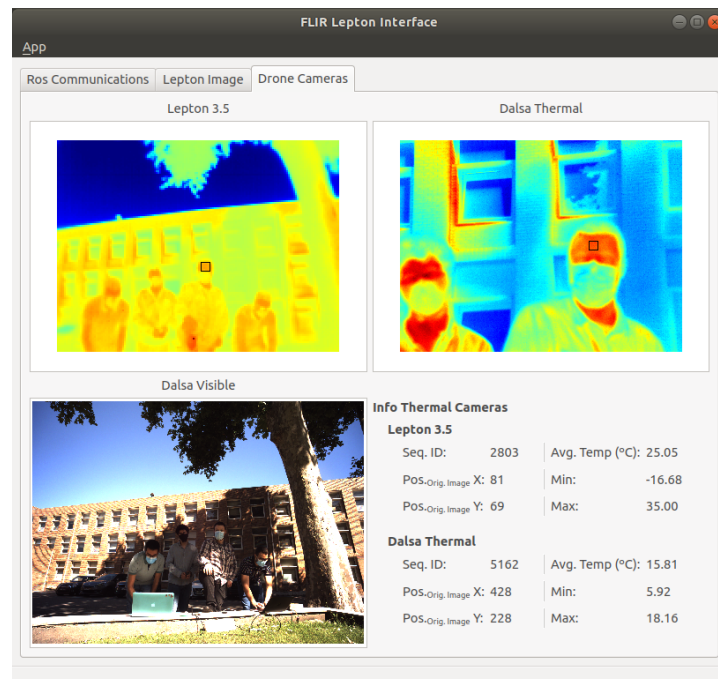


Figura 6.27: Imagem obtida durante o voo - Parte 4.

6.3 Resumo do capítulo

Neste capítulo foram efetuadas algumas experiências de modo a validar o sistema *low-cost IR*.

Os resultados laboratoriais permitiram verificar que o comportamento do sistema *low-cost IR* se mantinha coerente ao longo de, aproximadamente, 1h com aquilo que o fabricante anuncia no *datasheet* do sensor. Com estes testes, onde se observou um alvo a uma distância fixa e com um valor de temperatura uniforme, o *output* do sensor CMOS Lepton 3.5 é quarente com os $\pm 5^{\circ}\text{C}$ e $\pm 3^{\circ}\text{C}$ de precisão anunciados pelo fabricante, em modo *High Gain*. Estes valores variam consoante os cenários de observação e da temperatura ambiente (Tabela 5 no *datasheet* do fabricante). Pelos resultados obtidos no laboratório, conseguiu-se concluir que o comportamento do sensor CMOS se mantinha coerente ao longo de todos os testes e, assim sendo, não foi necessário calibrar o sistema *low-cost IR*.

Com a integração do sistema *low-cost IR* no UAV foi possível validar todo o hardware e software de aquisição de imagem do sensor CMOS. E os resultados obtidos foram bastante satisfatórios, uma vez que se conseguiu provar que o sensor tem boas características para alguns dos cenários de aplicação apresentados em 1.2.

Esta página foi intencionalmente deixada em branco.

Capítulo 7

Conclusão e trabalho futuro

Esta dissertação abordou o desenvolvimento de sistema de visão termográfica de baixo custo para veículos autônomos aéreos. A existência de inúmeros cenários de aplicação para este tipo de sistemas na área da robótica justifica a necessidade de um sistema de visão termográfico *low-cost*. Na maioria dos casos, este tipo de sistemas de visão são extremamente caros, o que pode dificultar a sua aplicação em cenários onde são necessários vários exemplares destes sistemas, assim como em cenários de alto risco de perda do equipamento. Assim sendo, torna-se necessário o desenvolvimento de um sistema de baixo custo, leve, de dimensões reduzidas e ainda com baixos consumos energéticos de modo a ser uma alternativa viável e de fácil integração com a arquitetura já existente dos robôs.

Iniciou-se com um estudo sobre as diferentes características do espectro IR, entre os quais:

- Características que definem a qualidade de uma imagem térmica;
- Projetos desenvolvidos nos cenários de aplicação mais comuns;
- Sistemas de visão termográfica mais utilizados;
- Sensores CMOS termográficos existentes.

Esta análise foi útil para perceber qual a melhor abordagem, podendo assim proceder-se à definição da arquitetura geral do sistema *low-cost* IR.

Para se utilizar o sensor CMOS Lepton 3.5 foi necessário desenvolver o hardware de alimentação e comunicação do próprio sensor, tal como, a PCB de conexão entre o sistema de aquisição de dados (Raspberry Pi 4) e sensor termográfico. Tendo em conta que se pretendia ter uma solução facilmente integrável com um dos robôs já existentes no

laboratório, era necessário que tivéssemos um sistema fechado, por isso ter sido necessário fazer uma caixa 3D onde estivesse a *Raspberry Pi 4* e o sensor CMOS Lepton 3.5, além de utilizar a *framework* ROS

De seguida, foi necessário desenvolver o driver de aquisição das imagens térmicas em RAW 14 bits, modo *default* no qual o sensor envia todas as imagens, para depois fazer o processamento das imagens/vídeo através da interface gráfica criada para o efeito. Nesta interface gráfica foi possível validar o driver de aquisição desenvolvido na *framework* ROS, assim como a extração dos valores de temperatura de cada pixel da imagem.

O processo de calibração é uma etapa importante em qualquer sistema de visão computacional, sendo que quanto mais precisa for a calibração, melhor será o desempenho do sistema. Desse modo, procedeu-se à execução de alguns testes laboratoriais que permitiram garantir que o sensor CMOS Lepton 3.5 se encontrava dentro dos parâmetros definidos pelo fabricante do sensor.

Depois de efetuados os testes laboratoriais, procedeu-se à integração do sistema *low-cost* IR no veículo autónomo STORK em conjunto com uma câmara IR, Teledyne DALSA Calibir GX, de forma a realizar testes comparativos entre os dois sistemas.

Com base nos resultados obtidos com a comparação entre o sistema *low-cost* IR com a câmara IR, Teledyne DALSA Calibir GX, foi possível comprovar que o sistema desenvolvido cumpre o objetivo pretendido, mas por um preço muito mais baixo.

Relativamente ao trabalho futuro, existem algumas melhorias que ponderam ser feitas de modo a potencializar o uso deste sensor CMOS IR, sendo um dos quais a construção de um sistema embebido onde fosse possível reduzir ainda mais o tamanho do sistema *low-cost*.

Na aplicação desenvolvida, poderia ser permitido ao utilizador configurar em *runtime* todos os seus parâmetros configuráveis do sensor CMOS Lepton 3.5, tais como: definição de uma ROI, controlo do shutter do sensor CMOS, resolução do sensor, entre outros. Isto porque o *driver* de aquisição já tem integradas todas as APIs necessárias para o controlo destes parâmetros.

Bibliografía

- [1] R. Gade and T. B. Moeslund. Thermal cameras and applications: a survey. In *Machine Vision and Applications*, pages 25: 245–262, 2014.
- [2] M. Vollmer and K. P. Mollmann. *Infrared Thermal Imaging: Fundamentals, Research and Applications*. Wiley-VCH, 2010.
- [3] R Siegel, M. Pinar Menguc, and J. R. Howell. *Thermal Radiation Heat Transfer*. 2015.
- [4] FLIR. The ultimate infrared handbook for r&d professionals.
- [5] A. Berg. Detection and tracking in thermal infrared imagery. In *Linköping studies in science and technology*, 2016.
- [6] Electrophysics Resource Center: Infrared Inspection. Understanding infrared camera thermal image quality. 2011.
- [7] J. R. Martínez-de Dios, L. Merino, and A. Ollero. Fire detection using autonomous aerial vehicles with infrared and visual cameras. 2005.
- [8] M. Bertozzi, A. Broggi, C. Caraffi, M. Rose, M. Felisa, and G. Vezzoni. Pedestrian detection by means of far-infrared stereo vision. In *Computer Vision and Image Understanding*, volume 106, pages 194–204, 2007.
- [9] R. Barber, M. A. Rodriguez-Conejo, J. Melendez, and S. Garrido. Design of an infrared imaging system for robotic inspection of gas leaks in industrial environments. In *International Journal of Advanced Robotic Systems*, 2014.
- [10] S. Hermesh. Wildfire infrared early detection system. Master’s thesis, California State University, Northridge, 2017.

- [11] M. Charvát. Detection of people in room using low-cost thermal imaging camera. Master's thesis, Brno University of Technology, 2018.
- [12] T. Santos. Método visual de deteção de linhas elétricas para veículos aéreos não tripulados. Master's thesis, Instituto Superior de Engenharia do Porto, 2017.
- [13] R. Neuville, J. S. Bates, and F. Jonard. Estimating forest structure from uav-mounted lidar point cloud using machine learning. *Remote Sensing*, 01 2021.
- [14] C. Eling, L. Klingbeil, and H. Kuhlmann. Real-time single-frequency gps/mems-imu attitude determination of lightweight uavs. *Sensors*, October 2015.
- [15] G. Balamurugan, J. Valarmathi, and V. P. S. Naidu. Survey on uav navigation in gps denied environments. *International conference on Signal Processing, Communication, Power and Embedded System (SCOPE)-2016*, 2016.
- [16] P. Sousa, A. Ferreira, M. Moreira, T. Santos, A. Martins, A. Dias, J. M. Almeida, and E. Silva. Isep/inesc tec aerial robotics team for search and rescue operations at the eurathlon challenge 2015. *2016 International Conference on Autonomous Robot Systems and Competitions*, 2016.
- [17] T. S. Fernandes. Planeamento de trajetória para operações de busca e salvamento com uavs. Master's thesis, Instituto Superior de Engenharia do Porto, 2016.
- [18] J. R. Martinez-De Dios and A. Ollero. Automatic detection of windows thermal heat losses in buildings using uavs. In *2006 World Automation Congress*, 2006.
- [19] L. Hoegner and U Stilla. Thermal leakage detection on building facades using infrared textures generated by mobile mapping. In *2009 Joint Urban Remote Sensing Event*, 2009.
- [20] E. Ohel, S. R. Rotman, D. G Blumberg, and L. Savig. Anomaly gas remote sensing and tracking using a field-portable imaging thermal radiometric spectrometer. In *IEEE 24th Convention of Electronics Engineers in Israel*, 2006.
- [21] A. W. Lewis, S. T. S. Yuen, and A. J. R. Smith. Detection of gas leakage from landfills using infrared thermography - applicability and limitations. In *Waste Management & Research*, 2003.
- [22] M. S. Jadin, K. H. Ghazali, and S. Taib. Thermal condition monitoring of electrical installations based on infrared image analysis. In *Saudi International Electronics, Communications and Photonics Conference*, 2013.

- [23] Y. M. Harry Ng, M. Yu, Y. Huang, and R. Du. Diagnosis of sheet metal stamping processes based on 3-d thermal energy distribution. In *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, volume 4, pages 22–30, 2007.
- [24] J. Cilulko, P. Janiszewski, M. Bogdaszewski, and E. Szczygielska. Infrared thermal imaging in studies of wild animals. In Springer, editor, *European Journal of Wildlife Research*, volume 59, pages 17–23, 2013.
- [25] M. R. Dunbar and K. A. MacCarthy. Use of infrared thermography to detect signs of rabies infection in raccoons. In *J Zoo Wildl Med*, December 2006.
- [26] R. Vadivambal and D. S. Jayas. Applications of thermal imaging in agriculture and food industry—a review. In *Food and Bioprocess Technology*, volume 4, pages 186–199, 2010.
- [27] K. Kheiralipour, H. Ahmadi, A. Rajabipour, S. Rafiee, M. Javan-Nikkhah, and D. S. Jayas. Development of a new threshold based classification model for analyzing thermal imaging data to detect fungal infection of pistachio kernel. *Agricultural Research*, 2, 6 2013.
- [28] J. H. Hwang, S. Jun, S. H Kim, D. Cha, K. Jeon, and J. Lee. Novel fire detection device for robotic fire fighting. In *ICCAS 2010*, pages 96–100, Oct 2010.
- [29] K. Wasaki, N. Shimoi, Y. Takita, and P. N. Kawamoto. A smart sensing method for mine detection using time difference ir images. In *Conference Documentation International Conference on Multisensor Fusion and Integration for Intelligent Systems*, pages 133–139, Aug 2001.
- [30] H. Silva, J. M. Almeida, F. Lopes, J. P. Ribeiro, S. Freitas, G. Amaral, C. Almeida, A. Martins, and E. Silva. Uav trials for multi-spectral imaging target detection and recognition in maritime environment. 2016.
- [31] D. W. Casbeer, D. B. Kingston, R. W. Beard, and T. W. Mclain. Cooperative forest fire surveillance using a team of small unmanned air vehicles. In *International Journal of Systems Science*, volume 37, pages 351–360, May 2006.
- [32] H. Kayan, R. Eslampanah, F. Yeganli, and M. Askar. Heat leakage detection and surveillance using aerial thermography drone. In *2018 26th Signal Processing and Communications Applications Conference (SIU)*, pages 1–4, May 2018.

- [33] Byrnes and James (Ed.). *Unexploded Ordnance Detection and Mitigation*. Springer Science & Business Media, 2008.
- [34] M. A. Bramson. *Infrared Radiation: A Handbook for Applications*. Springer Science & Business Media, 2013.
- [35] H. Kaplan. *Practical Applications of Infrared Thermal Sensing and Imaging Equipment*, volume TT75. SPIE Press, third edition edition, 2007.
- [36] FLIR. *Lepton with Radiometry Quickstart Guide*, August 2018.
- [37] A. Xhafa. Development and evaluation of a low-cost infrared thermal camera for industrial predictive maintenance applications. Master's thesis, Universitat Politècnica de Catalunya, June 2017.
- [38] FLIR. *Software Interface Description Document (IDD)*, August 2018.