

INSTITUTO SUPERIOR DE ENGENHARIA DO PORTO

Sistema Autónomo de Aquisição de Imagens de Alta Resolução de Plâncton

João Filipe Amorim Resende



Mestrado em Engenharia Eletrotécnica e de Computadores

Área de Especialização em Sistemas Autónomos

Departamento de Engenharia Eletrotécnica

2020

Este relatório satisfaz, parcialmente, os requisitos que constam da Ficha de Unidade Curricular de Tese/Dissertação, do 2.º ano, do Mestrado em Engenharia Eletrotécnica e de Computadores.

Candidato: João Filipe Amorim Resende 1140569@isep.ipp.pt

Orientação científica: Alfredo Manuel Oliveira Martins, aom@isep.ipp.pt



Mestrado em Engenharia Eletrotécnica e de Computadores

Área de Especialização em Sistemas Autónomos

Departamento de Engenharia Eletrotécnica

Instituto Superior de Engenharia do Porto

29 de Julho de 2020

**ESTA PÁGINA
FOI PROPOSITADAMENTE
DEIXADA EM BRANCO**

“They can’t scare me, if I scare them first.”

Stefani Germanotta

**ESTA PÁGINA
FOI PROPOSITADAMENTE
DEIXADA EM BRANCO**

Agradecimentos

A realização e conclusão desta dissertação de mestrado não se teria tornado numa realidade sem o apoio e incentivo de diversas pessoas. Manifesto, assim, o meu maior agradecimento aos que contribuíram direta ou indiretamente para o meu sucesso.

Professor Alfredo Martins, meu orientador, obrigado por toda a sua disponibilidade, paciência e participação no decorrer deste projeto. Desejo igualmente agradecer ao Laboratório de Sistema Autónomos por me ter proporcionado todo o conhecimento e ter disponibilizado o equipamento necessário, tornando possível a realização deste projeto.

A todos os colegas do mestrado, em especial: ao Guedes, companheiro de missões; ao Zé, por me manter os níveis de sanidade estáveis; e ao Barbosa, colega de trabalho. Obrigado pelas noites de jogos e pelos jantares em amigos, por me apoiarem e atenderem às minhas preocupações e dúvidas.

À Joana, companheira de meditação, que durante esta pandemia mundial equilibrou a negatividade da situação com a sua amizade.

Ao João, por todos os conhecimentos e conselhos transmitidos, pelo apoio excecional, e pela grande amizade de longos anos que esteve presente em todos os momentos.

Por último, quero dar os meus maiores agradecimentos à minha família, aos meus pais, João e Arminda, à minha irmã Shirley e à Catarina por todo o amor, apoio incondicional e incentivo demonstrados ao longo de todo o meu percurso académico.

A todos vós dedico este trabalho!
João Resende.

**ESTA PÁGINA
FOI PROPOSITADAMENTE
DEIXADA EM BRANCO**

Resumo

O plâncton é um conjunto de organismos aquáticos que vivem dispersos em vários ecossistemas, tais como oceanos, mares, rios e lagos, estando este dividido em dois principais grupos, fitoplâncton e zooplâncton. Estes desempenham um papel importante na transferência de biomassa bacteriana entre organismos maiores, tendo elevada importância trófica nas dietas de muitas espécies marinhas. Alguns destes organismos, como por exemplo o Copépode, são nutrientes essenciais para peixes prematuros e zooplâncton de elevadas dimensões, que por sua vez alimentam peixes adultos consumidores de plâncton.

Estes organismos não só são importantes na cadeia alimentar em *habitats* aquáticos, como também são usados como um dos bioindicadores para a caracterização da saúde de um ecossistema aquático. Tal deve-se ao facto de estes organismos não sobreviverem num ambiente que não proporcione as suas necessidades físicas, químicas e nutricionais, sendo possível associar a ausência ou abundância destes organismos à qualidade ambiental de um determinado ecossistema.

O trabalho apresentado nesta dissertação endereça o estudo destes organismos com uma solução baseada num sistema autónomo subaquático de aquisição de imagens para monitorização biológica marinha. Este sistema, denominado Sistema Autónomo de Aquisição de Imagens de Alta Resolução de Plâncton, é composto por dois encapsulamentos modulares: um que armazena a configuração ótica, a unidade de processamento e a unidade de monitorização das baterias e outro para o sistema de iluminação síncrona.

Os resultados obtidos com o sistema, tanto em condições laboratoriais como em condições reais, são apresentados e discutidos, permitindo a caracterização e validação do desempenho do Sistema Autónomo de Aquisição de Imagens de Alta Resolução de Plâncton.

Palavras-Chave: sistema autónomo, sistema de aquisição de imagem subaquático, zooplâncton

**ESTA PÁGINA
FOI PROPOSITADAMENTE
DEIXADA EM BRANCO**

Abstract

Plankton are organisms that live scattered in various ecosystems such as oceans, seas, rivers, lakes and ponds. These are divided into two main groups, phytoplankton and zooplankton. These microscopic organisms play an important role in the transfer of bacterial biomass to larger organisms, being considered of trophic importance in the diets of many marine species. Some zooplankton, like Copepoda, are essential nutrients for early fish larvae and for larger predacious zooplankton, which in turn feed late larvae fish as well as many plankton-eating adult fishes.

Not only are these organisms important in the food chain link in aquatic habitats, but they are also used as a bioindicator for aquatic ecosystem health, since an organism cannot survive in an environment that does not provide its physical, chemical and nutritional requirements. Given the current ecological aspects of ecosystems from sea margins, rivers and lakes, all over the world, “Human-made” pollution is already causing evident damage. If left unchecked it will lead to the weakening of these ecosystems.

The work presented in this thesis addresses the study of these organisms with a solution based on an underwater autonomous imaging system for marine biological monitoring. This system, named Autonomous High-Resolution Image Acquisition System for Plankton, comprises two modular housings: one that stores the optical setup, the image processing unit and battery monitoring unit and another for the synchronous illumination system.

The results obtained with the system both in laboratory conditions and in the field are presented and discussed allowing the characterization and validation of the performance of the Autonomous High-Resolution Image Acquisition System for Plankton.

Keywords: autonomous system, underwater image system, plankton, phytoplankton, zooplankton.

**ESTA PÁGINA
FOI PROPOSITADAMENTE
DEIXADA EM BRANCO**

Conteúdo

1	Introdução	1
1.1	Contextualização	1
1.2	Motivação	4
1.3	Objetivos	7
1.4	Estrutura da Dissertação	7
2	Revisão Bibliográfica	9
2.1	Fundamentos Óticos	9
2.1.1	Introdução	9
2.1.2	Câmara Digital	9
2.1.3	Conceitos Óticos	17
2.1.4	Tipos de Lentes	20
2.1.5	Iluminação	24
2.2	Estado da Arte	28
2.2.1	Introdução	28
2.2.2	Sistemas de Rede de Captação de Plâncton	29
2.2.3	Sistemas de Aquisição de Imagens de Plâncton	30
2.2.4	Sistemas de Aquisição Holográfica de Plâncton	40
2.2.5	Análise Comparativa	44
3	Projeto do Sistema Autônomo de Aquisição de Imagens de Alta Resolução de Plâncton	51
3.1	Introdução	51
3.2	Cenário de Operação	51
3.3	Arquitetura do Sistema	56
3.3.1	Arquitetura do <i>Hardware</i>	56
3.3.2	Arquitetura do <i>Software</i>	57
3.4	Dimensionamento	58
3.4.1	Câmaras	58
3.4.2	Lentes	62
3.4.3	Iluminação	64
3.4.4	SBCs	64
3.4.5	Consumo Energético	66
3.4.6	Estrutura Mecânica	67
4	Implementação e Resultados	69
4.1	Introdução	69
4.2	Estrutura Mecânica	69

4.2.1	Estrutura Interna	69
4.2.2	Estrutura Externa	71
4.2.3	Simulação - <i>Finite Element Method</i>	75
4.2.4	Maquinação e Validação da Estrutura Mecânica	80
4.3	<i>Hardware</i>	82
4.3.1	BMS	82
4.3.2	Placa de Iluminação	86
4.4	<i>Software</i>	88
4.4.1	SBC	89
4.4.2	BMS	90
4.5	Resultados Experimentais	94
4.5.1	Testes Laboratoriais	94
4.5.2	Testes em Cenário Real	96
4.6	Melhorias Implementadas	98
4.6.1	Sistema de Iluminação	98
4.6.2	Sistema Ótico	100
4.6.3	Estrutura Mecânica	104
5	Conclusões e Trabalho Futuro	117
5.1	Conclusões	117
5.2	Trabalho Futuro	118
	Referências	119
A	Estudo dos Componentes	129
B	Under PressureTM Design - Relatório de Simulação	131
C	Desenhos da Estrutura Mecânica	133
D	BMS - <i>Battery Management System</i>	139
E	Desenhos da Estrutura Mecânica Melhorada	141
F	Simulação FEM para a Estrutura Mecânica com as Novas Varas	149

Lista de Figuras

1.1	Diversos tipos de plâncton.	2
1.2	Representação de plâncton na cadeia alimentar.	3
1.3	Projeto MarinEye - descrição do protótipo.	5
1.4	Projeto Spilless - Cenário de demonstração.	6
2.1	Princípio de funcionamento de uma câmara de <i>pinhole</i>	10
2.2	Vista da Janela em Le Gras.	10
2.3	Arquitetura <i>Full Frame</i>	12
2.4	Arquitetura <i>Interline</i>	13
2.5	Arquitetura <i>Frame Transfer</i>	14
2.6	Arquitetura CMOS.	15
2.7	Ilustração de um sensor de píxel ativo.	15
2.8	Técnicas de aquisição de imagem.	16
2.9	Efeito de distorção de um objeto em movimento captado através de um obturador <i>Rolling Shutter</i>	16
2.10	Parâmetros básicos de uma típica configuração ótica.	17
2.11	Demonstração do campo de visão de uma imagem para diferentes valores de distância focal.	18
2.12	Comportamento ótico de dois objetos quando visualizados através de uma lente de distância focal fixa e uma lente telecêntrica.	19
2.13	Variação da abertura da lente com a profundidade de campo.	20
2.14	Lente de distância focal fixa focada a duas distâncias de trabalho diferentes.	21
2.15	Comportamento ótico de uma lente telecêntrica.	22
2.16	Feixes de luz atravessados por um sistema de lente telecêntrica.	22
2.17	Feixes de luz atravessados por um sistema de lente bi-telecêntrica.	23
2.18	Comparação dos feixes de luz atravessados pelos diferentes sistema óticos.	23
2.19	Métodos de iluminação.	24
2.20	Diferentes métodos de iluminação <i>bright field, front lighting</i>	25
2.21	<i>Dark field, front lighting</i>	26
2.22	<i>Bright field, back lighting</i>	27
2.23	Diferença entre a influência da iluminação colimada e a iluminação difusa.	27
2.24	<i>Dark field, back lighting</i>	28
2.25	<i>The Lightframe On-sight Keyspecies Investigation</i>	30
2.26	<i>The Video Plankton Recorder II</i>	31
2.27	Fluxograma do <i>software</i> de processamento de imagem e exibição de dados do VPRII.	32
2.28	<i>The Zooplankton Visualization and Imaging System</i>	32
2.29	Fluxograma do <i>software</i> de processamento de imagem do ZOOVIS.	33

2.30	O GUARD1.	34
2.31	Arquitetura do sistema GUARD1.	34
2.32	<i>Scripps Plankton Camera System 2.</i>	35
2.33	<i>The Continuous Particle Imaging Classification System.</i>	36
2.34	Arquitetura do processamento de imagem do CPICS.	36
2.35	<i>The Underwater Vision Profiler 5.</i>	37
2.36	<i>In situ ichthyoplankton imaging system.</i>	39
2.37	<i>The Shadowed Image Particle Profiling Evaluation Recorder.</i>	40
2.38	Sistemas aquisição de imagens holográficas de plâncton.	41
2.39	<i>The Electronic Holographic Camera.</i>	41
2.40	<i>The Free-Drifting Submersible Digital Holographic Imaging System.</i>	42
2.41	<i>The Digital in-line Holographic Microscope.</i>	43
2.42	<i>The Submersible Digital Holographic Particle Imager.</i>	44
2.43	Comparação de duas amostras iluminadas por técnicas de iluminação diferentes.	46
2.44	Processo inicial de bioincrustação, a partir da acumulação química e adesão bacteriana.	47
2.45	Mecanismo de remoção de incrustações adotado pelo SPC2.	47
2.46	Taxonomia dos principais sistemas descritos.	49
3.1	Cenário de aplicação do TURTLE.	53
3.2	Ilustração de uma amarração oceanográfica.	54
3.3	Fotografia do MarinEye em missão.	55
3.4	Arquitetura de alto nível do <i>hardware</i> do sistema.	56
3.5	Arquitetura de alto nível do <i>software</i> do sistema.	57
3.6	Conceito de arquitetura do <i>software</i> de processamento e classificação.	58
3.7	Descrição do sensor com e sem lente ótica.	60
3.8	Amostra do Copépode utilizado.	60
3.9	Simulação teórica da captura do Copépode por cada uma das câmaras.	61
3.10	Comportamento ótico da câmara UI-3590CP com lentes de diferente PMAG.	63
3.11	Simulação teórica da captura do Copépode do <i>setup</i> escolhido.	64
3.12	Ilustração de um <i>setup</i> do SLS utilizado no LSA.	64
3.13	Ilustração das SBCs reunidas.	65
3.14	Placas de acesso às interfaces do módulo da NVIDIA.	66
3.15	Esquema conceptual da estrutura mecânica.	67
4.1	Peças do suporte interno.	70
4.2	Ilustração 3D da estrutura interna.	70
4.3	Peças desenvolvidas para a secção 1 da estrutura externa.	71
4.4	Ilustração 3D do sistema de proteção utilizado na tampa frontal.	72
4.5	Ilustração 3D da tampa traseira da secção 1 do cilindro.	73
4.6	Peças desenvolvidas para a secção 2 da estrutura externa.	74
4.7	Ilustração 3D da tampa traseira da secção 2 do cilindro.	74
4.8	Ilustração 3D da estrutura mecânica.	75
4.9	Interações definidas com o modelo mecânico considerado na simulação.	75
4.10	Resultado da simulação de <i>von Mises</i> para uma pressão externa de 10 bar.	76
4.11	Valor máximo de pressão interna atingido na estrutura para uma pressão externa de 10 bar.	77
4.12	Resultado da simulação de <i>displacement</i> para uma pressão externa de 10 bar.	77

4.13	Valor máximo de deformação atingido na estrutura para uma pressão externa de 10 bar.	78
4.14	Resultado da simulação <i>von Mises</i> para uma pressão externa de 100 bar. . .	78
4.15	Valor máximo de pressão interna atingido na estrutura para uma pressão externa de 100 bar.	79
4.16	Resultado da simulação de <i>displacement</i> para uma pressão externa de 100 bar.	79
4.17	Valor máximo de deformação atingido na estrutura para uma pressão externa de 100 bar.	80
4.18	Maquinação da tampa traseira da secção 2 da estrutura externa.	80
4.19	Estrutura mecânica.	81
4.20	Teste de submersão da estrutura mecânica a uma profundidade de 8 m. . . .	81
4.21	Esquema de ligação do IC de monitorização das baterias.	82
4.22	Esquema de ligação do IC LTC2955IDDB.	83
4.23	Esquema de ligação dos dois conversores abaixadores de tensão.	84
4.24	Esquema de ligação do microcontrolador.	84
4.25	Esquema de ligação do IC de conversor de tensão.	85
4.26	Dimensão e visão superior e inferior da PCB do BMS.	85
4.27	PCB do BMS.	86
4.28	Esquema de ligação dos LEDs da placa do sistema de iluminação.	86
4.29	Dimensão e visão superior e inferior da PCB do sistema de iluminação. . . .	87
4.30	PCB do sistema de iluminação.	87
4.31	Arquitetura de <i>software</i> detalhada.	88
4.32	Exemplo de uma publicação do comando de <code>start</code> no tópico <code>light</code> do nó <code>lights_control</code>	89
4.33	Representação dos tópicos publicados pelo nó <code>ueye_cam</code>	89
4.34	Exemplo de uma mensagem publicada pelo tópico <code>ROS</code> do sistema de monitorização das baterias.	90
4.35	Cenários possíveis para a execução das tarefas.	91
4.36	<i>Setup</i> de incubação de artémias instalado no LSA.	95
4.37	Resultado da captação de uma imagem em laboratório.	95
4.38	Testes de aquisição de imagens em cenário real.	96
4.39	Classificação de alguns dos organismos capturados pelo sistema desenvolvido.	97
4.40	Representação da irregularidade na iluminação causada pela placa de iluminação.	98
4.41	Dimensões e ilustração 3D da nova PCB de iluminação.	98
4.42	Composição do sistema de iluminação com a nova placa de iluminação. . . .	99
4.43	Representação da correção da irregularidade na iluminação causada pela placa de iluminação.	99
4.44	<i>Kit</i> do alvo de teste USAF 1951 desenvolvido.	100
4.45	Resultados obtidos a uma distância entre o USAF e a lente ótica de 110 mm.	101
4.46	Representação da distância entre o sistema ótico e o sistema de iluminação.	101
4.47	Representação da distância entre o sistema ótico e o sistema de iluminação após correção do comprimento das varas de suporte.	102
4.48	Resultados obtidos com uma distância entre o USAF e a lente ótica de 150 mm.	102
4.49	Resultado da captação de uma imagem em laboratório após a correção da vara de suporte.	103
4.50	Comparação dos resultados obtidos antes, imagem da esquerda, e após, imagem da direita, a correção da distância de focagem.	103

4.51	Resultado da captação de uma imagem em cenário real após a correção da vara de suporte.	104
4.52	Esquema conceptual da nova estrutura mecânica.	105
4.53	Peças de suporte interno da nova estrutura.	106
4.54	Esquema 3D da nova estrutura interna.	106
4.55	Esquema das peças da secção 1 da nova estrutura externa.	107
4.56	Esquema 3D do sistema de proteção da tampa frontal da nova estrutura mecânica.	108
4.57	Esquema 3D da tampa traseira do cilindro.	108
4.58	Esquema 3D do sistema de iluminação em anel.	109
4.59	Esquema das peças da secção 3 da estrutura externa.	109
4.60	Esquema da nova estrutura mecânica.	110
4.61	Interações definidas na simulação da nova estrutura mecânica.	110
4.62	Resultado da simulação de <i>von Mises</i> da nova estrutura para uma pressão externa de 10 bar.	111
4.63	Valor máximo de pressão interna atingido na nova estrutura para uma pressão externa de 10 bar.	111
4.64	Resultado da simulação de <i>displacement</i> da nova estrutura para uma pressão externa de 10 bar.	112
4.65	Valor máximo de deformação atingido na nova estrutura para uma pressão externa de 10 bar.	112
4.66	Resultado da simulação de <i>von Mises</i> da nova estrutura para uma pressão externa de 100 bar.	113
4.67	Valor máximo de pressão interna atingido na nova estrutura para uma pressão externa de 100 bar.	114
4.68	Resultado da simulação de <i>displacement</i> para uma pressão externa de 100 bar.	114
4.69	Valor máximo de deformação atingido na nova estrutura para uma pressão externa de 100 bar.	115
F.1	Resultado da simulação <i>von Mises</i> para uma pressão externa de 10 bar.	149
F.2	Valor máximo de pressão interna atingido na estrutura para uma pressão externa de 10 bar.	150
F.3	Resultado da simulação de <i>displacement</i> para uma pressão externa de 10 bar.	150
F.4	Valor máximo de deformação atingido na estrutura para uma pressão externa de 10 bar.	151
F.5	Resultado da simulação <i>von Mises</i> para uma pressão externa de 100 bar.	151
F.6	Valor máximo de pressão interna atingido na estrutura para uma pressão externa de 100 bar.	152
F.7	Resultado da simulação de <i>displacement</i> para uma pressão externa de 100 bar.	152
F.8	Valor máximo de deformação atingido na estrutura para uma pressão externa de 100 bar.	153

Lista de Tabelas

1.1	Divisão de plâncton em classe e dimensões.	3
2.1	Interfaces de comunicação e a sua respetiva taxa máxima de transmissão associada.	11
2.2	Breve descrição das principais características dos sistema de aquisição de imagens de plâncton.	48
2.3	Breve descrição das principais características dos sistemas de aquisição de imagens holográficas de plâncton.	49
3.1	Descrição dos parâmetros das câmaras recolhidas.	59
3.2	Descrição dos parâmetros das lentes recolhidas.	62
3.3	Descrição dos parâmetros das SBCs reunidas.	65
3.4	Resultados da frequência de aquisição que cada SBC suporta.	66
3.5	Propriedades do alumínio 6063-T6.	68
3.6	Dimensionamento do cilindro.	68
4.1	Propriedades do vidro borossilicato	73
4.2	Parâmetros utilizados para a criação da <i>mesh</i> do modelo da simulação.	75
4.3	Trama de pedido.	92
4.4	Trama de resposta.	93
4.5	Trama de resposta ao pedido leitura de tensão.	93
4.6	Trama de resposta ao pedido de leitura de status.	93
4.7	Trama de erro.	94
4.8	Comprimento total dos diferentes estágios de uma artémia.	94

**ESTA PÁGINA
FOI PROPOSITADAMENTE
DEIXADA EM BRANCO**

Lista de Acrónimos

API	<i>Application Programming Interface</i>
ARN	<i>Ácido Ribonucleico</i>
AUV	<i>Autonomous Underwater Vehicle</i>
BMS	<i>Battery Management System</i>
CAD	<i>Computer-aided Design</i>
CCD	<i>Charged Coupled Devices</i>
CHDK	<i>Canon Hack Development Kit</i>
CIIMAR	<i>Centro Interdisciplinar de Investigação Marinha e Ambiental</i>
CMOS	<i>Complementary Metal Oxide Semiconductor</i>
CNC	<i>Computer Numerical Control</i>
CPU	<i>Central Processing Unit</i>
FEA	<i>Finite Element Method</i>
FF	<i>Full Frame</i>
FPGA	<i>Field-Programmable Gate Array</i>
FT	<i>Frame Transfer</i>
FoV	<i>Horizontal Field of View</i>
GP	<i>Genetic Programming</i>
GPRS	<i>General Packet Radio Service</i>
GPS	<i>Global Position System</i>
GSM	<i>Global System for Mobile Communications</i>
GigE	<i>Gigabit Ethernet</i>
HFoV	<i>Horizontal Field of View</i>
I/O	<i>Input/output</i>
IC	<i>Integrated Circuit</i>
IDS	<i>Imaging Development Systems</i>
IL	<i>Interline</i>

INESC TEC	Instituto de Engenharia de Sistemas e Computadores, Tecnologia e Ciência
LASER	<i>Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation</i>
LED	<i>Light-Emitting Diode</i>
LiPo	Polímero de Lítio
MOSFET	<i>Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor</i>
MSER	<i>Maximally Stable Extremal Regions</i>
PCB	<i>Printed Circuit Board</i>
PMAG	<i>Primary Magnification</i>
PPI	<i>Pixels per Inch</i>
PPmm	<i>Pixels per Millimeter</i>
PTP	<i>Precision Time Protocol</i>
PoE	<i>Power Over Ethernet</i>
RGB	<i>Red-Green-Blue</i>
ROI	<i>Region of Interest</i>
ROS	<i>Robot Operating System</i>
RTOS	<i>Real Time Operating System</i>
SBC	<i>Single Board Computer</i>
SLS	<i>Structured Light System</i>
SMV	<i>Support Machine Vector</i>
SPI	<i>Serial Peripheral Interface</i>
USB	<i>Universal Serial Bus</i>
UV	Ultravioleta
VFoV	<i>Vertical Field of View</i>

Capítulo 1

Introdução

1.1 Contextualização

Os oceanos e os mares adjacentes ocupam aproximadamente 71 % da superfície do planeta Terra, retendo um volume total de $1.35 \times 10^9 \text{ km}^3$ e contêm 97 % dos recursos hídricos do planeta. Estes recursos constituem um papel importante na existência de qualquer organismo no nosso planeta. Porém, ainda existem vastas regiões inexploradas e ecossistemas que ainda não foram caracterizados, tornando a compreensão de fenômenos biológicos, químicos e físicos bastante limitada [1].

Considerando não só os atuais aspectos ecológicos de ecossistemas, como, por exemplo, oceanos, rios e lagos, como também a agravação das alterações climáticas, é possível observar danos evidentes provenientes da poluição humana, que se não forem analisados e controlados, irão levar ao enfraquecimento e desaparecimento desses ecossistemas.

Muitos avanços já foram realizados na observação de fatores físicos e químicos, contudo existem ainda outros fatores em que quer a inexistência de dados quer a dificuldade da sua obtenção limita a análise de estes aspectos ecológicos, destacando-se os fatores biológicos, com evidente relevância no estudo de um ecossistema.

De forma a colmatar estes problemas, o sistema de monitorização será capaz de permitir a caracterização de ecossistemas marinhos, como, por exemplo, através da contabilização da quantidade de plâncton existente num determinado ecossistema de forma a melhor avaliá-lo e classificá-lo [2].

O plâncton, ilustrado na Figura 1.1, é um conjunto de organismos que vivem dispersos em vários ecossistemas aquáticos, tais como oceanos, mares, rios e lagos, estando este dividido em dois principais grupos, fitoplâncton e o zooplâncton.

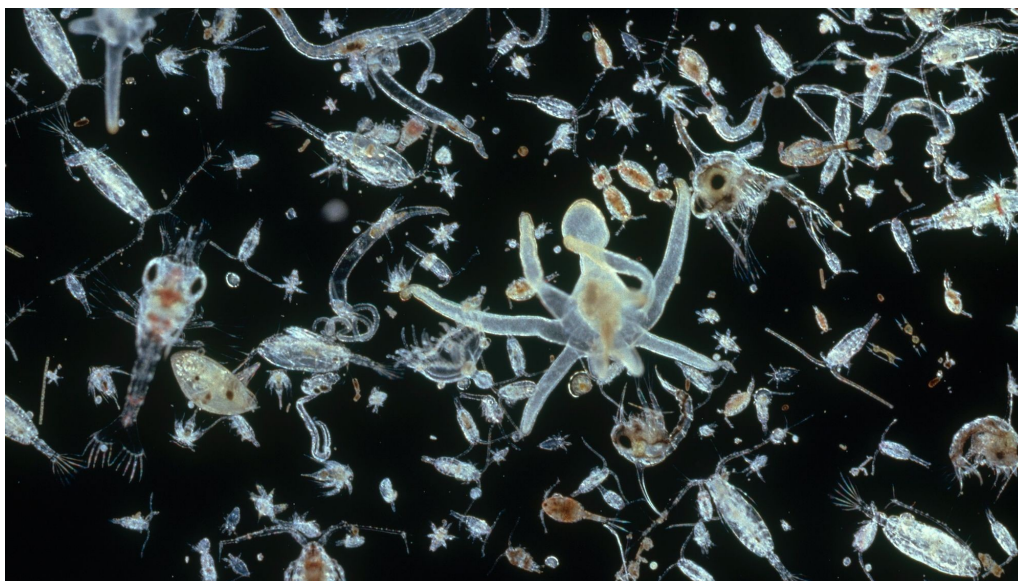


Figura 1.1: Diversos tipos de plâncton [3].

- **Fitoplâncton:** O fitoplâncton é um conjunto de organismos vegetais microscópicos. Estes são seres autotróficos¹ e habitam nas zonas superficiais dos corpos de água de forma a utilizarem a luz solar como a sua única fonte de energia, através do processo de fotossíntese [4]. Como qualquer outra planta, o fitoplâncton absorve dióxido de carbono e liberta oxigénio, sendo este responsável por cerca de metade da fotossíntese realizada no planeta, tornando-se assim num dos produtores mais importantes de oxigénio do mundo [3]. A maioria destes organismos possui dimensões reduzidas, variando desde nanómetros a centímetros. Estes organismos são considerados os produtores primários da base da cadeia alimentar [5], como é possível observar na Figura 1.2.
- **Zooplâncton:** O zooplâncton é um conjunto de organismos aquáticos heterotróficos² que se alimentam de objetos que se encontram na coluna de água, podendo estes ser fitoplâncton, zooplâncton ou detritos. O zooplâncton abrange um vasto conjunto de diferentes organismos que apresentam várias dimensões, podendo variar desde micrómetros a metros [5]. O zooplâncton é considerado um dos organismos mais importantes na cadeia alimentar entre os produtores primários e os níveis tróficos mais altos, uma vez que muito zooplâncton se alimenta de fitoplâncton, que por sua vez são alimento para zooplâncton, peixes, crustáceos e outras espécies maiores [3], como é possível observar na Figura 1.2.

¹Autotrofismo ou seres autotróficos, são todos os organismos que são capazes de produzir o seu próprio alimento através de substâncias não orgânicas, como por exemplo luz.

²Heterotrofismo ou seres heterotróficos, são todos os organismos que são incapazes de produzir o seu próprio alimento, alimentando-se de outros seres vivos de modo a produzir energia.

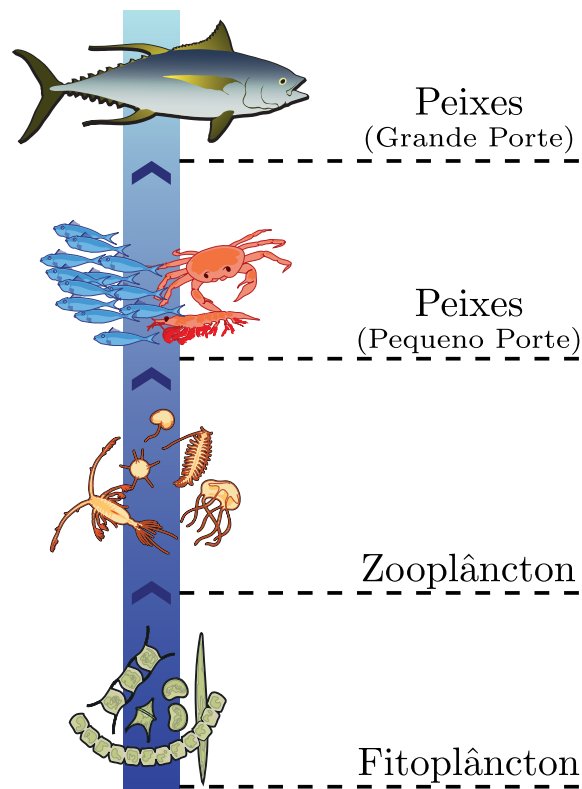


Figura 1.2: Representação de plâncton na cadeia alimentar.

Assim, verifica-se que estes organismos desempenham um papel importante na transferência de biomassa bacteriana entre organismos maiores, sendo considerados uma importância trófica nas dietas de muitas espécies marinhas [6]. Estes organismos não só são importantes na cadeia alimentar em *habitats* aquáticos, como também são usados como um dos bioindicadores para a caracterização da saúde de um ecossistema aquático. Tal deve-se ao facto de estes organismos não sobreviverem num ambiente que não proporcione as suas necessidades físicas, químicas e nutricionais, sendo possível associar a ausência ou abundância destes organismos à qualidade ambiental de um determinado ecossistema [7].

Na Tabela 1.1 é possível observar plâncton dividido, em termos da sua classe e dimensões.

Tabela 1.1: Divisão de plâncton em classe e dimensões (adaptado de [8, 9]).

Classe	Tamanho	Organismos
Nanoplâncton	2 μm a 20 μm	<i>Ciliates</i> , pequenos <i>Diatoms</i> e <i>Dinoflagellates</i>
Microplâncton	20 μm a 200 μm	Etapas iniciais de <i>Copepods</i> , <i>Foraminifera</i>
Mesoplâncton	200 μm a 20 mm	<i>Amphipods</i> , <i>Appendicularians</i> , <i>Chaetognaths</i> , <i>Copepods</i> , <i>Thaliaceans</i> (<i>Doliolids</i> e <i>Salps</i>)
Macroplâncton	20 mm a 200 mm	<i>Euphausiids</i> , <i>Heteropods</i> , <i>Jellyfish</i> , <i>Larval Fish</i> , <i>Mysids</i> , <i>Pteropods</i> , <i>Solitary Salps</i>
Megaplâncton	> 200 mm	<i>Jellyfish</i> , <i>Colonial Salps</i>

De acordo com o que foi mencionado anteriormente, os danos provenientes da poluição humana têm vindo a prejudicar vários ecossistemas. Um exemplo, é a produção mundial de plástico que tem vindo a aumentar consideravelmente desde o desenvolvimento de polímeros sintéticos [10], sendo que é estimado que pelo menos 5.25×10^{12} de partículas de plástico encontram-se distribuídas pelos oceanos [11]. O desgaste mecânico, ação biológica e a luz solar degradam estes materiais em pedaços de dimensões reduzidas, entre 1 mm a 5 mm, denominados de microplástico, podendo ainda, através de degradação adicional, originar pedaços de dimensões na ordem dos nanómetros. Assim, alguns organismos, tais como zooplâncton, pequenos peixes e outros seres vivos da cadeia alimentar, são confundidos por estes materiais degradados acabando por os consumir [12].

Uma vez que o microplástico apresenta dimensões idênticas ao do plâncton, a utilização deste sistema de captação de imagens poderá permitir, para além da captação de imagens de plâncton, a captação de imagens de microplástico. No entanto a utilização deste sistema para a análise de microplásticos não faz parte do âmbito desta dissertação.

1.2 Motivação

O trabalho apresentado nesta dissertação teve como objetivo principal o desenvolvimento de uma ferramenta para o estudo destes organismos. Desta forma foi desenvolvido um sistema autónomo de aquisição de imagens de alta resolução de plâncton.

Esta dissertação surgiu no âmbito da unidade curricular Tese/Dissertação do Mestrado em Engenharia Eletrotécnica e de Computadores na área de especialização de Sistemas Autónomos do Instituto Superior de Engenharia do Porto. Esta foi realizada em ambiente laboratorial no Laboratório de Sistemas Autónomos, pertencente ao Centro de Robótica e Sistemas Autónomos do Instituto de Engenharia de Sistemas e Computadores, Tecnologia e Ciência (INESC TEC). Este centro está focalizado em quatro áreas de investigação principais: navegação autónoma; missões de longo prazo; sensorização, mapeamento e intervenção; operações de múltiplas plataformas [13].

A principal motivação para o desenvolvimento desta dissertação recaiu no elevado interesse científico da análise das diferentes interações entre os ecossistemas marinhos e nos efeitos secundários a estes associados, devido a agentes externos como a poluição.

Neste âmbito, foram realizados vários estudos e projetos de investigação, que permitiram o desenvolvimento de novos sistemas de monitorização marinha, com recurso a sensores e outros equipamentos.

Nos últimos anos, a colaboração de vários grupos de investigação portugueses, entre os quais o INESC TEC e o Centro Interdisciplinar de Investigação Marinha e Ambiental (CIIMAR), tem permitido o elevado investimento na área de investigação e monitorização marinha, com o desenvolvimento de diversos projetos de investigação e desenvolvimento (I&D), entre os quais se destacam o MarinEye, o CORAL e o Spillless.

O MarinEye - *A prototype for multitrophic oceanic monitoring* (2015-2017) - foi um projeto financiado pela agência EEA Grants, através do programa *Integrated Marine and Coastal Management*, cujo principal objetivo estava relacionado com o desenvolvimento de um sistema autônomo de monitorização marinha que fornecesse ferramentas para a recolha e monitorização de análise química, física e biológica, de modo a tornar possível avaliar as interações entre a biodiversidade e a influência destas na estabilidade do ecossistema [14].

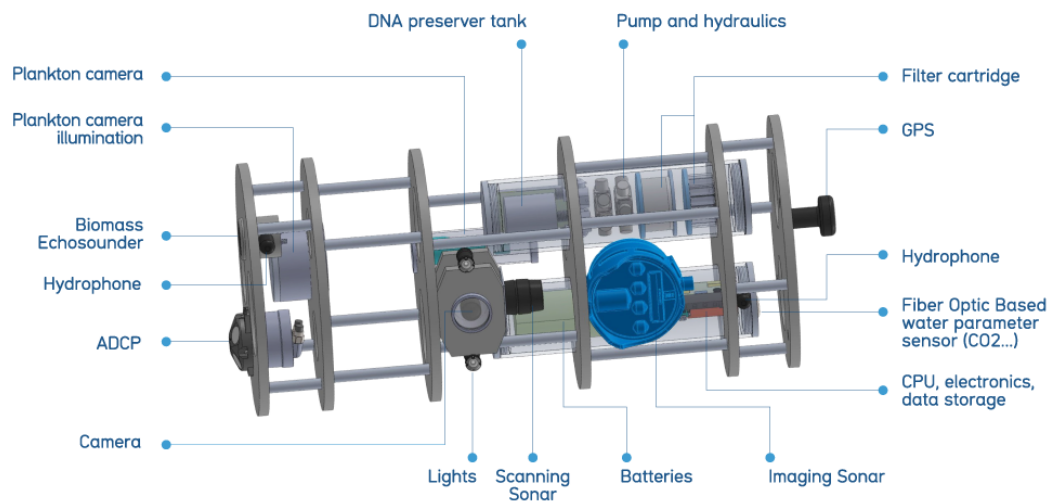


Figura 1.3: Projeto MarinEye - Descrição do protótipo [15].

Na Figura 1.3 pode observar-se o conceito desenvolvido para o projeto MarinEye. Este será constituído por um conjunto de sensores de análise física e química de determinadas propriedades da água, um sistema de filtração e recolha de amostras de água para posterior extração de ácido ribonucleico (ARN), um sistema de aquisição de imagem de plâncton e um sistema acústico de avaliação de biomassa, de modo a fornecer informações relevantes para a caracterização e estudo biológico dos ecossistemas marinhos.

O CORAL - *Sustainable Ocean Exploitation: Tools and Sensors* (2016-2018) - foi um projeto financiado pela União Europeia através do programa Fundo Europeu de Desenvolvimento Regional (FEDER), cujo principal objetivo consistiu na investigação e desenvolvimento de ferramentas e sensores, capaz de realizar explorações sustentáveis dos recursos existentes no mar profundo.

Este projeto foi implementado através de duas linhas de investigação: a BLUETOOLS - *Tools and Technologies for management of Deep Sea resource exploitation* - que consistiu na criação de ferramentas tecnológicas que permitam a exploração e a monitorização da água, do solo e subsolo, e a BlueSensors - *Photonic Technologies for Ocean Monitoring and Exploitation* - que consistiu no desenvolvimento de sensores inovadores, baseados em tecnologia fotónica, para a avaliação de parâmetros como a evolução da qualidade da água,

o impacto na biodiversidade e nas infraestruturas marinhas, contribuindo para uma gestão e exploração eficiente dos recursos marinhos [16].

O Spillless - *First line response to oil spillless based on native microorganisms cooperation* (2017-2019) - foi um projeto financiado pela União Europeia através do Fundo Europeu dos Assuntos Marítimos e das Pescas, que visou implementar uma abordagem inovadora para a introdução de soluções viáveis, de modo a colmatar uma das mais prejudiciais fontes de poluição marítima, os derrames de petróleo.

Na Figura 1.4 é possível observar o conceito associado ao uso de soluções baseadas na produção de dois ou mais grupos microbianos com capacidade de biorremediação³ e na adaptação de veículos não tripulados e autónomos para libertação *in situ* de microorganismos e nutrientes [17].

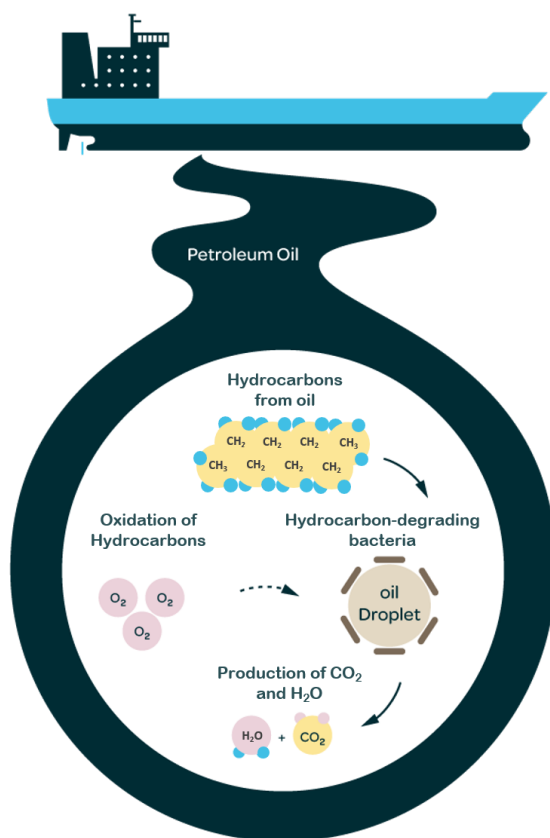


Figura 1.4: Projeto Spillless - Cenário de demonstração [17].

Deste modo, considerando os projetos de investigação apresentados, a motivação para o desenvolvimento deste trabalho prendeu-se na necessidade de monitorização, avaliação e classificação de ecossistemas marinhos através do uso de um sistema de captação de imagens de plâncton para posterior caracterização. Este terá que ser capaz de ser utilizado

³A biorremediação é um processo, de custo reduzido, que consiste na utilização de organismos ou enzimas para a remoção ou redução de áreas contaminadas de um ecossistema. Este processo consiste na biodegradação de resíduos poluentes de forma a restabelecer o equilíbrio de um ecossistema.

tanto em modo autónomo, ancorado em plataformas fixas e móveis, como também em modo integrado, isto é, como um sensor adicional noutros sistemas, como por exemplo, num AUV, do inglês *Autonomous Underwater Vehicle*.

1.3 Objetivos

O principal objetivo desta dissertação consiste no desenvolvimento de um sistema de aquisição de imagens de alta resolução de plâncton para ambiente subaquático. Este sistema é composto por uma configuração ótica e um sistema de iluminação, que permite a captação de imagens de micro-organismos.

Deste modo, de forma a possibilitar a realização de uma solução funcional, o desenvolvimento deste projeto passa pelo cumprimento dos seguintes objetivos:

- Estudo e análise do estado da arte dos sistemas de aquisição de imagens de plâncton existentes e tecnologias associadas;
- Estudo de possíveis soluções óticas;
- Desenvolvimento de uma solução mecânica adequada para a recolha de imagem em ambiente marinho;
- Desenvolvimento de uma solução de *hardware* integrada para aquisição e registo em tempo real de imagens de plâncton;
- Desenvolvimento de *software* de controlo, aquisição e registo de imagem;
- Validação e caracterização em laboratório e em cenário real da solução desenvolvida.

1.4 Estrutura da Dissertação

Esta dissertação encontra-se dividida em capítulos e estes em subcapítulos, de forma a ser possível uma melhor compreensão e organização da informação relativa a todo o projeto desenvolvido.

No Capítulo 1 é apresentada uma breve análise da relevância do tema da dissertação, é realizada uma contextualização ao tema e apresentadas as motivações que levaram ao seu desenvolvimento e a descrição de alguns projetos em desenvolvimento no Laboratório de Sistemas Autónomos alusivos ao tema, bem como os principais objetivos a cumprir.

No Capítulo 2 são apresentados os fundamentos óticos e o estado da arte. Relativamente aos Fundamentos Óticos são apresentados alguns conceitos teóricos fundamentais, como por exemplo o funcionamento dos sensores de imagem utilizados nas câmaras digitais, alguns conceitos óticos importantes para a compreensão de determinadas nomenclaturas e tópicos de ótica, diferentes tipos de lentes óticas e os diferentes métodos de iluminação utilizados nestes *setups* óticos. No Estado da Arte é realizado um estudo dos diferentes métodos de captação destes organismos, no qual são reunidas informações relevantes sobre os principais projetos onde são aplicados estes métodos, sendo realizada uma análise às suas

características e discriminando-se as suas principais vantagens e desvantagens. O capítulo encerra com um sumário no qual são discutidas as principais conclusões relativamente a todos os temas abordados neste mesmo capítulo.

No Capítulo 3 são apresentados os requisitos mais relevantes para o dimensionamento do sistema e os principais cenários de aplicação do projeto a desenvolver, as arquiteturas de *hardware* e *software* e o dimensionamento do projeto, onde é apresentada uma análise dos diferentes componentes selecionados e a justificação da sua seleção.

No Capítulo 4 é apresentada a estrutura mecânica desenvolvida e a sua respetiva simulação FEM (do inglês *Finite Element Method*), realizada no *software* SolidWorks, onde é possível observar o comportamento da estrutura para diferentes pressões. De seguida, é apresentado o *hardware* e *software* desenvolvido para o controlo do sistema de monitorização das baterias e para a unidade de processamento. Neste capítulo são também apresentados os resultados experimentais obtidos em laboratório e em cenário real. Por fim, são apresentadas as melhorias implementadas, descrevendo-se as alterações realizadas na estrutura mecânica e apresentando-se, posteriormente, uma nova estrutura mecânica.

No Capítulo 5 são apresentadas as conclusões obtidas após a realização do projeto da dissertação, encerrando-se o capítulo com a referência a algumas sugestões para futuros desenvolvimentos.

Capítulo 2

Revisão Bibliográfica

2.1 Fundamentos Óticos

2.1.1 Introdução

Um sistema moderno de aquisição de imagem é composto essencialmente por uma câmara digital e uma lente ótica. O objetivo principal do uso de qualquer lente ótica recai na captação de luz disseminada por um objeto de modo a recriar uma imagem do mesmo através de um sensor sensível à luz, tipicamente um sensor do tipo CCD (do inglês *Charged Coupled Devices*) ou CMOS (do inglês *Complementary Metal Oxide Semiconductor*).

Deste modo, em 2.1.2 são descritos os tópicos de formação de imagem, interface e sensor relativos a câmaras digitais. Em 2.1.3 são apresentados alguns dos parâmetros fundamentais utilizados em ótica, a relação entre a distância focal e o campo de visão e a relação entre a abertura da lente e a profundidade de campo. Em 2.1.4 são apresentados dois tipos de lentes: lentes de distância focal fixa e lentes telecêntricas. Por fim, em 2.1.5 são descritos os principais métodos de iluminação existentes.

2.1.2 Câmara Digital

2.1.2.1 Formação de Imagem

Uma câmara estenopeica, ou câmara *pinhole*, é uma câmara que utiliza o fenómeno ótico denominado de “câmara escura” para a aquisição de imagens. Este princípio básico do processo de criação de imagem ocorre quando uma imagem de um cenário é projetada através de um pequeno orifício, formando uma imagem invertida na superfície oposta à abertura.

É possível observar na Figura 2.1 que, através de um pequeno orifício, os raios de luz atravessam a primeira superfície e formam uma imagem invertida do cenário, neste caso de uma vela. Este processo de criação de imagem foi utilizado pela primeira vez no Século XVII, porém este não utilizava qualquer tipo de lente ótica e não era capaz de armazenar a imagem, apenas projetá-la.

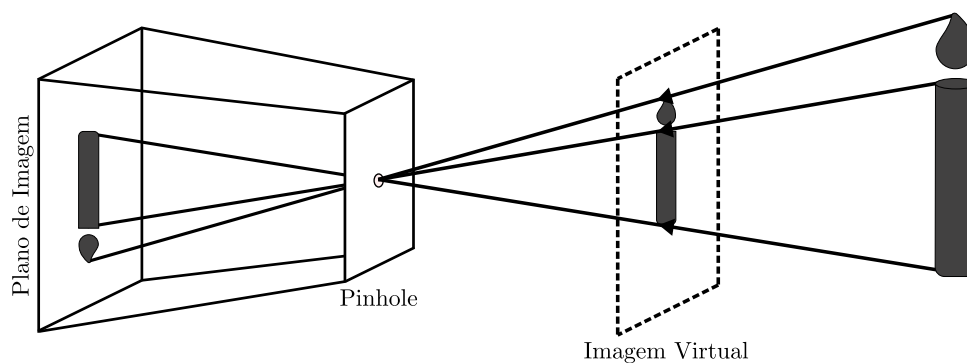


Figura 2.1: Princípio de funcionamento de uma câmara de *pinhole* [18].

Somente no século XIX foi capturada e armazenada, pelo inventor francês Nicéphore Niépce, uma imagem utilizando este fenómeno. Este recorreu à focalização da projeção numa placa de estanho revestida com *Bitumen of Judea*, um asfalto de origem natural e sensível à luz, produzindo o que geralmente é descrito como a primeira fotografia do mundo, ilustrada na Figura 2.2.

A introdução da câmara analógica por Geroge Eastman, empresário americano que fundou a Eastman Kodak Company, foi um avanço no armazenamento de imagem uma vez que este utilizava películas fotográficas na sua primeira câmara fotográfica denominada “Kodak”. Este processo de criação de imagem beneficiava do fenómeno “câmara escura” e focalizava a projeção da imagem numa película fotográfica composta por pequenos cristais de prata sensíveis à luz, obtendo-se uma imagem após vários processos químicos.







Figura 2.2: Vista da Janela em Le Gras.

Com os avanços tecnológicos, o processo de aquisição de imagem passou por uma transformação colossal, principalmente no que concerne aos componentes que são utilizados. As câmaras digitais utilizam o mesmo princípio de funcionamento, contudo, em vez de um *pinhole*, é utilizada uma lente ótica para a projeção da imagem e, em vez de uma película fotográfica, é utilizado um sensor de imagem, evitando por completo a utilização de processos adjacentes para a formação de uma imagem.

2.1.2.2 Interface

Relativamente à interface de comunicação, novos tipos de interface foram introduzidos no mercado de forma a aumentar a taxa de transmissão de dados. Assim, na Tabela 2.1 é possível observar as interfaces de comunicação mais utilizadas em câmaras digitais.

Tabela 2.1: Interfaces de comunicação e a sua respetiva taxa máxima de transmissão associada.

			
USB 3.1 ≥ 5 Gbit/s	USB 3.0 5 Gbit/s	USB 2.0 480 Mbit/s	GigE Vision 1 Gbit/s

Tal como é possível observar na Tabela 2.1, relativamente às interfaces USB (do inglês *Universal Serial Bus*) o USB 3.1 veio substituir as versões mais antigas desse protocolo, como por exemplo, a versão USB 2.0 e USB 3.0. Por norma esta interface utiliza um conector de 24 pinos, denominado “USB-C”, desenvolvido com a finalidade de melhorar as especificações convencionadas dos conectores e cabos utilizados nas outras interfaces, sendo capaz de suportar correntes entre 3 A a 5 A e tensões de 20 V, isto é, potências entre os 60 W e 100 W.

A interface mais comum em sistemas de visão por computador é a GigE Vision, que é baseada no protocolo *gigabit ethernet* e utiliza cabos CAT5e e CAT6 de forma a tornar possível atingir taxas de transmissão na ordem dos Gigabit. Este tipo de interface permite a ligação de um grande número de câmaras, através do uso de um *switch*, como também permite o sincronismo entre as mesmas, graças ao protocolo PTP (do inglês *Precision Time Protocol*). Este tipo de interface pode utilizar a tecnologia de transmissão de energia PoE (do inglês *Power over Ethernet*) o que possibilita a transmissão de energia juntamente com os dados para um dispositivo. No entanto, isto implica que o *hardware* seja compatível com esta tecnologia, uma vez que nem todas as placas *Ethernet* são capazes de fornecer energia para a alimentação de determinados dispositivos, sendo necessário o uso de um injetor PoE.

É de salientar que qualquer uma das interfaces apresentadas permite a alimentação da câmara, contudo esta também pode ser fornecida através de conectores especiais. Adicionalmente, alguns destes conectores permitem o acesso a outras funcionalidades, como por exemplo, o sinal de *trigger*.

2.1.2.3 Sensor

Relativamente ao tipo de sensores utilizados, existem essencialmente dois tipos: CCD e CMOS.

No caso de sensores CCD, podem ser utilizadas três diferentes arquiteturas: *Full Frame* (FF), *Interline* (IL) e *Frame Transfer* (FT).

- *Full Frame*

A arquitetura *Full Frame* é a mais simples e a mais utilizada em sensores CCD, consistindo num sensor composto por células fotossensíveis que se encontram expostas à luz. A leitura dos píxeis de uma imagem para o *buffer* de *readout* é realizada, linha a linha, através do uso de um sinal de relógio, sendo o tempo da transferência determinado principalmente pela taxa de *clock* do *shift* das linhas do sensor. Na Figura 2.3 é possível observar uma ilustração do funcionamento de um sensor composto por 23 píxeis horizontais e 18 píxeis verticais, sendo necessários 18 sinais de relógio para a deslocação vertical de cada linha de píxeis para o *buffer* de *readout* e 23 sinais de relógio para o esvaziamento do *buffer*, sendo este processo intercalado [19].

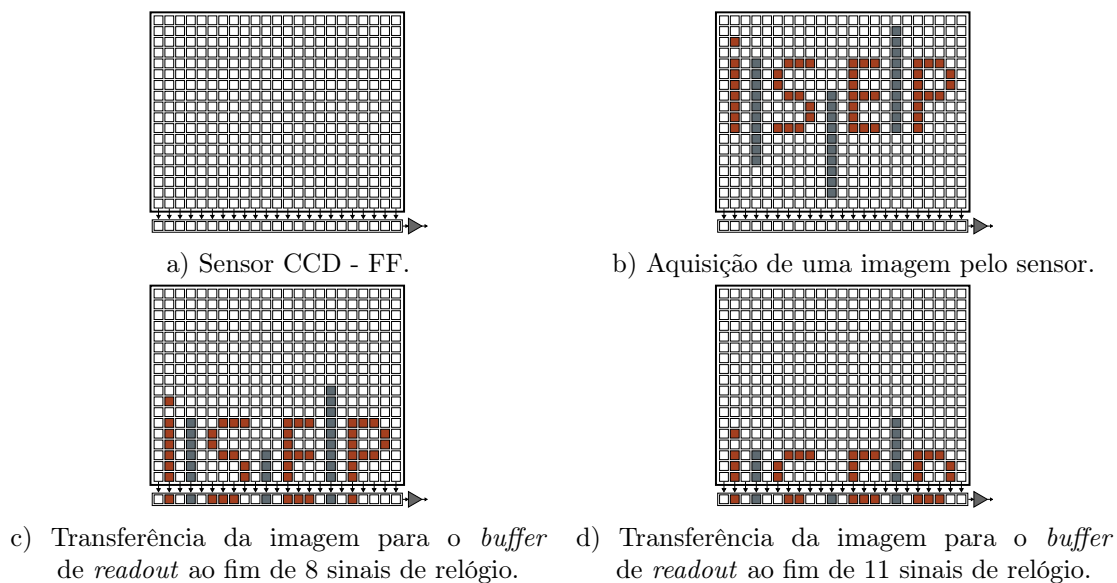


Figura 2.3: Arquitetura *Full Frame*.

- *Interline*

A arquitetura *Interline* consiste num sensor composto por uma estrutura híbrida que agrega píxeis sensíveis à luz e uma coluna de fotodíodos protegidos (ou seja, não sensíveis à luz), incorporados separadamente em cada elemento de píxel. Esta arquitetura consiste na transferência do *frame* para os fotodíodos adjacentes, sendo o tempo da transferência determinado principalmente pela taxa de *clock* do *shift* das linhas do sensor. Ao longo deste processo de *readout*, a área exposta do CCD encontra-se disponível para uma nova exposição [19].

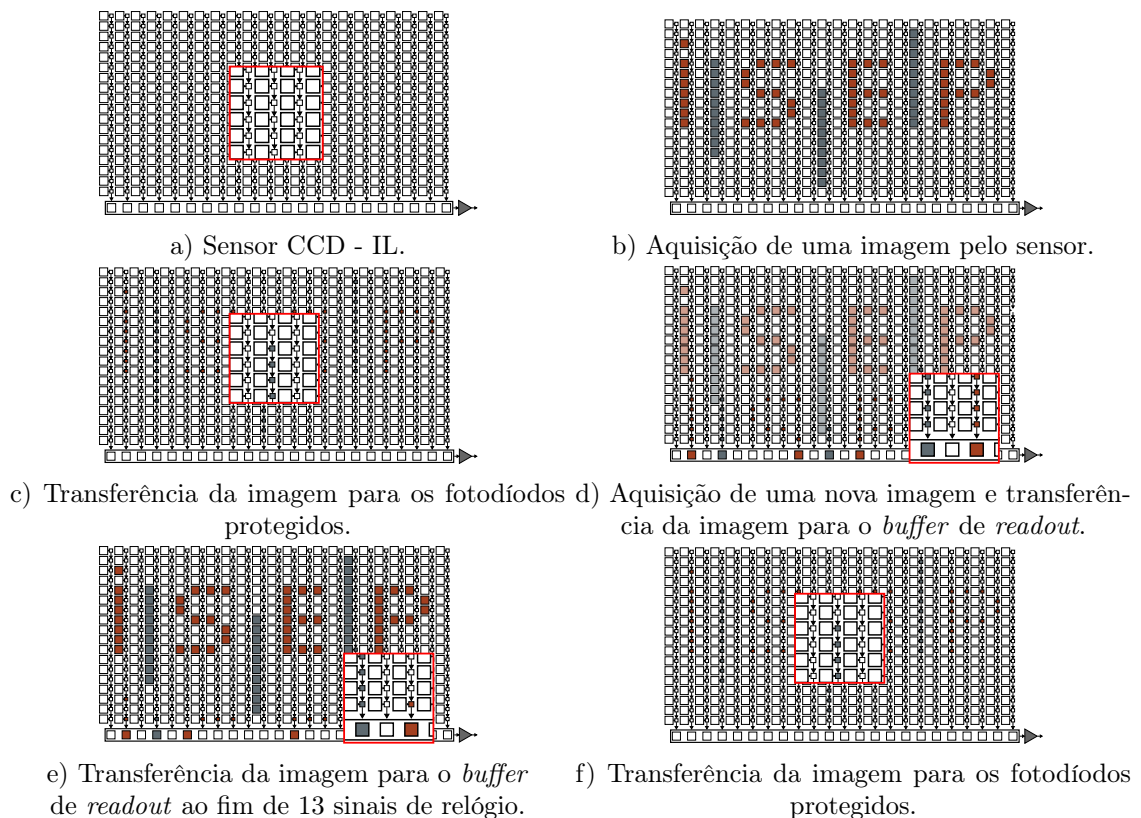


Figura 2.4: Arquitetura *Interline*.

- *Frame Transfer*

A arquitetura *Frame Transfer* consiste num sensor composto por duas áreas: a primeira composta por células sensíveis à luz, que se encontram expostas, e uma segunda área protegida, não sensível à luz, composta pelo mesmo número de células fotossensíveis. Esta arquitetura consiste na transferência do *frame* para as células da área protegida, sendo o tempo da transferência determinado principalmente pela taxa de *clock* do *shift* das linhas do sensor. Uma vez terminada a transferência, as células são transferidas da mesma forma que na arquitetura *Full Frame*. Ao longo deste processo de *readout* da área protegida, a área exposta do CCD encontra-se disponível para uma nova exposição [20, 19].

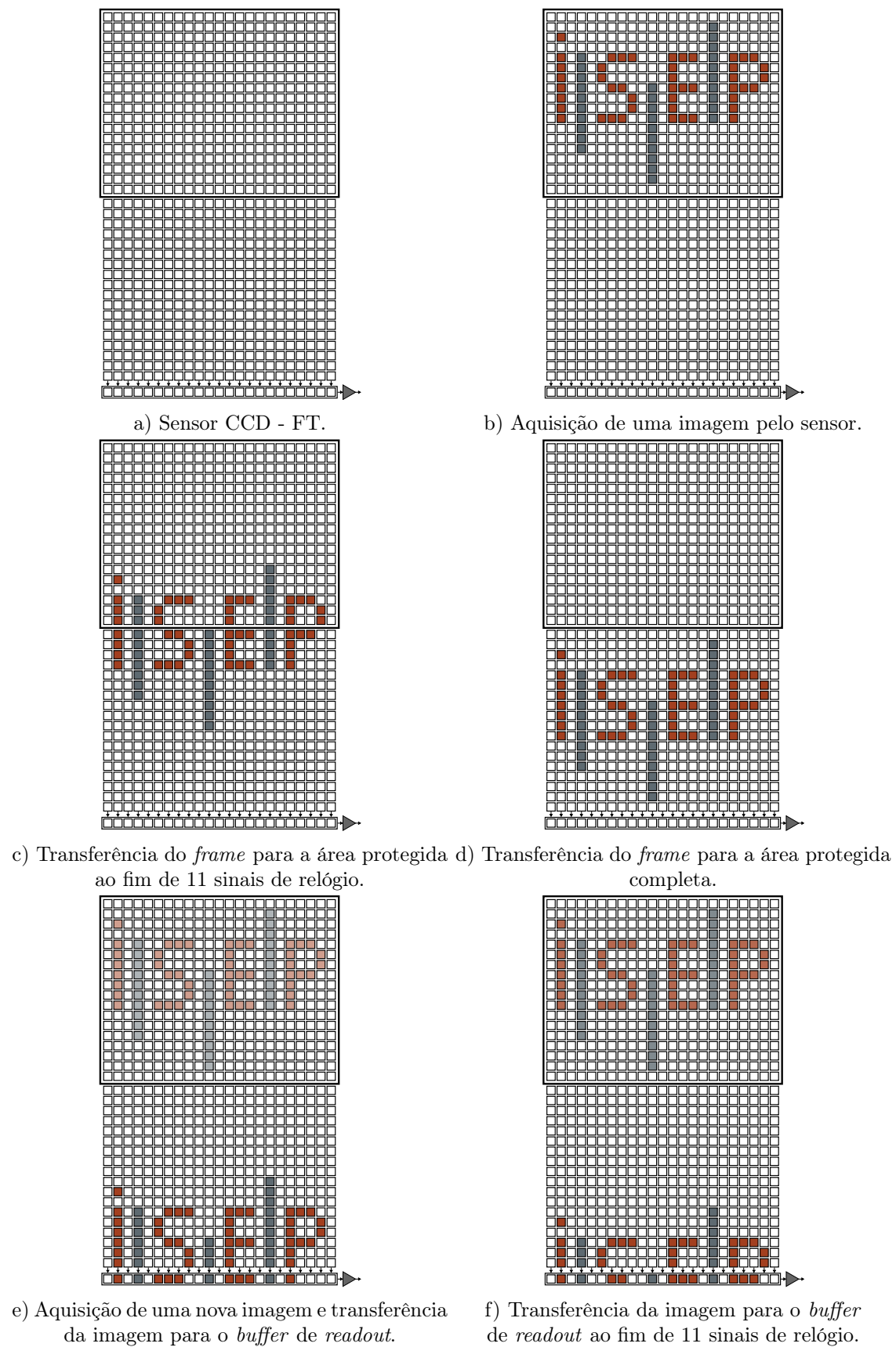


Figura 2.5: Arquitetura *Frame Transfer*.

No caso dos sensores CMOS, estes são conceptualmente diferentes dos sensores CCD, uma vez que cada píxel possui o seu próprio circuito de processamento. Na Figura 2.6 encontra-se ilustrada a arquitetura de um sensor CMOS.

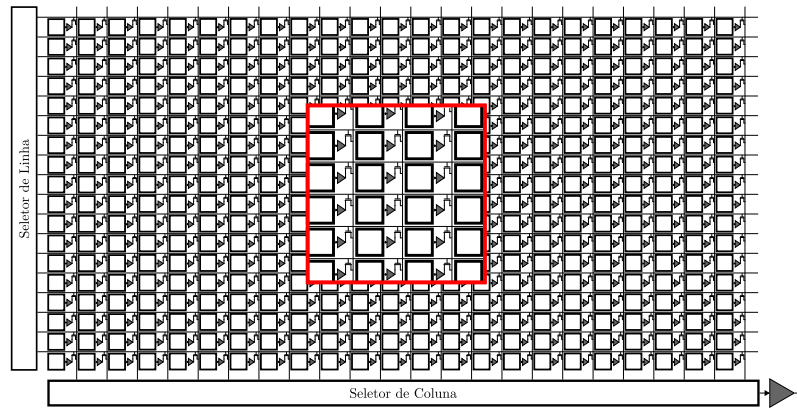


Figura 2.6: Arquitetura CMOS.

Na Figura 2.7 pode observar-se a arquitetura de um píxel de um sensor CMOS, na qual é ilustrado o circuito de processamento do mesmo.

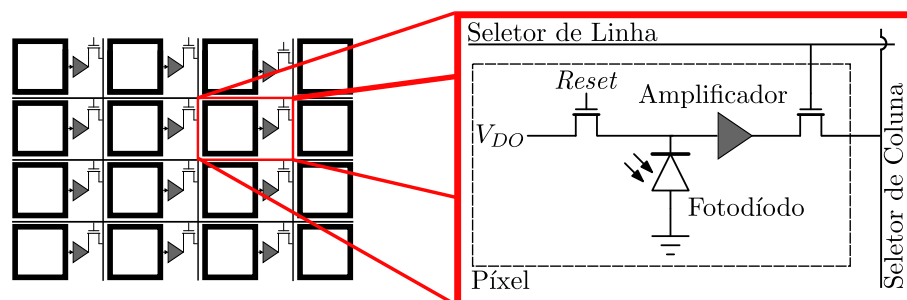


Figura 2.7: Ilustração de um sensor de píxel ativo (adaptado de [21]).

Dependendo da aplicação, é também necessário optar pela técnica de aquisição *Area Scan* ou *Line Scan*, representadas respetivamente na Figura 2.8.

Na técnica de aquisição *Area Scan*, o objeto é focalizado no sensor da câmara e a aquisição do mesmo é realizada ao nível do píxel para reconstrução. No caso da técnica de aquisição *Line Scan*, uma vez que os píxeis estão organizados de forma linear, o objeto a ser captado tem que se mover perpendicularmente ao eixo de varrimento do sistema, de forma a que a aquisição seja realizada linha a linha e reconstruída através do uso de *software*. Ao contrário da técnica *Area Scan*, que apresenta limitações impostas pela velocidade e tamanho do objeto, a técnica *Line Scan* permite efetuar aquisições com elevada resolução, apesar do objeto ter de se mover perpendicularmente ao eixo de varrimento da câmara com elevada precisão, dado que este método é bastante propício a distorções.

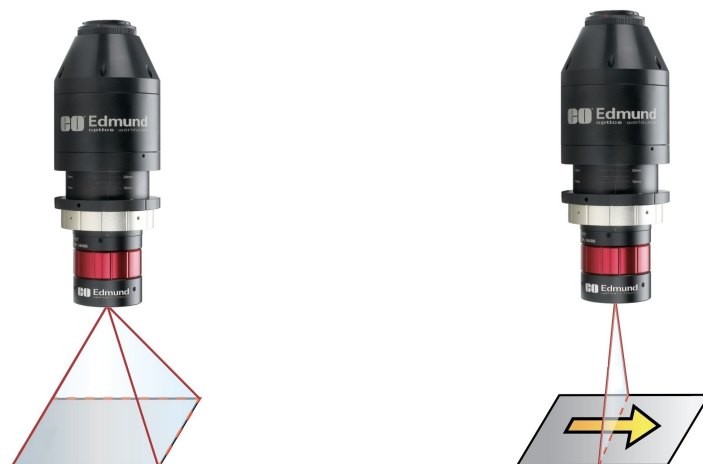
a) Técnica de aquisição *Area Scan*.b) Técnica de aquisição *Line Scan*.

Figura 2.8: Técnicas de aquisição de imagem [22].

2.1.2.4 Obturador

Um fator importante na seleção de uma câmera digital é o tipo de obturador utilizado, podendo este ser *Global Shutter* ou *Rolling Shutter*. Num obturador *Global Shutter*, a exposição dos píxeis começa e termina ao mesmo tempo para todos os píxeis. No caso de um obturador *Rolling Shutter*, a exposição dos píxeis é realizada sequencialmente, o que implica que cada linha do sensor é exposta em instantes ligeiramente diferentes. Assim, no caso do *Rolling Shutter*, as imagens que não se encontrem estacionárias, sofrem de efeitos de distorção, porém este efeito não é perceptível quando o movimento do objeto em questão é reduzido. Na Figura 2.9 é possível observar o efeito de distorção de um objeto em movimento quando captado por um obturador *Rolling Shutter*.

Figura 2.9: Efeito de distorção de um objeto em movimento captado através de um obturador *Rolling Shutter* [23].

Analisando a Figura 2.9 é possível observar o efeito de distorção do obturador *Rolling Shutter* nas pás do helicóptero, uma vez que estas apresentam uma curvatura que não corresponde à realidade.

2.1.3 Conceitos Óticos

2.1.3.1 Parâmetros Fundamentais

De forma a facilitar a compreensão dos diversos tópicos de ótica abordados ao longo da dissertação, são apresentados, neste secção, determinados parâmetros de ótica importantes. Assim, na Figura 2.10, é possível observar uma configuração ótica com a ilustração de determinados parâmetros, sendo eles:

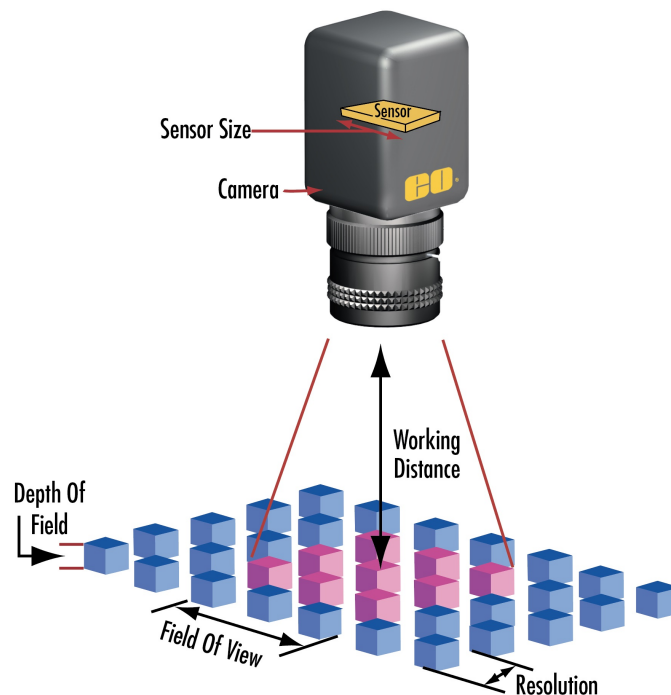


Figura 2.10: Parâmetros básicos de uma típica configuração ótica [22].

- FOV: o campo de visão (em inglês *field of view*) consiste na porção da área total de uma imagem que ocupa, por completo, o sensor de uma câmara;
- WD: a distância de trabalho (em inglês *working distance*) é a distância entre a face inferior da lente e a face superior do objeto, onde este se encontra o mais nítido possível na imagem;
- Resolução: a resolução (em inglês *resolution*) é um parâmetro que depende principalmente da lente e da resolução da câmara. Esta consiste no tamanho mínimo das características de um objeto que pode ser distinguido por um sistema de aquisição de imagem, isto é, a distância mínima entre dois pontos que ainda podem ser distinguidos como dois pontos separados na imagem;
- DOF: a profundidade de campo (em inglês *depth of field*) consiste essencialmente na

distância entre o ponto mais próximo e o ponto mais distante em que um objeto mantém uma nitidez aceitável assegurando vários planos de focagem, isto é, a quantidade de movimento que um objeto pode realizar mantendo uma nitidez constante;

- Tamanho do Sensor: o tamanho do sensor (em inglês *sensor size*) corresponde ao tamanho da área ativa do sensor da câmara, normalmente especificado na dimensão horizontal, sendo este um parâmetro importante na seleção da lente ótica;
- PMAG: a ampliação de uma lente (em inglês *primary magnification*) como o seu nome indica, consiste na ampliação que uma lente impõe na representação de um objeto no sensor da câmara, sendo definida pela razão entre o tamanho do sensor e o FOV.

2.1.3.2 Relação entre Distância Focal e Campo de Visão

Um dos parâmetros mais relevantes para avaliar as características de uma lente, é o seu campo de visão (AFOV - *Angular Field of View*). Na Equação 2.1 é descrita a relação existente entre o AFOV [°], a dimensão horizontal do sensor, h [mm], e a distância focal, f [mm].

$$\text{AFOV} = 2 \times \text{atan} \left(\frac{h}{2 \times f} \right) \quad (2.1)$$

Através da análise da Equação 2.1, pode concluir-se que, para um determinado tamanho de sensor, quanto menor for a distância focal mais amplo é o ângulo do campo de visão. A distância focal pode ser vista como a quantidade de área captada pelo sensor, uma vez que quanto maior a distância focal, menor o FOV, tal como se evidencia na Figura 2.11.



Figura 2.11: Demonstração do campo de visão de uma imagem para diferentes valores de distância focal [24].

Numa lente de distância focal fixa (em inglês *Fixed Focal Length*) o AFOV também é fixo, logo, ao focar a lente para diferentes distâncias de trabalho, diferentes campos de visão podem ser obtidos, porém o ângulo de visão é constante. Uma vez que as lentes de distância focal fixa possuem um AFOV fixo, existem três formas de alterar o FOV de um sistema equipado com uma lente de distância focal fixa. A primeira opção é a alteração da distância de trabalho, uma vez que, ao afastar a lente do plano em que o objeto se encontra, o campo de visão aumenta. A segunda opção é a alteração da lente por uma lente de distância focal fixa diferente. E a terceira opção é a alteração do tamanho do sensor, uma vez que um sensor maior proporciona um FOV maior à mesma distância de trabalho. É de salientar que lentes de distância focal fixa não devem ser confundidas com lentes de foco fixo, uma vez que estas últimas destinam-se a ser utilizadas a uma determinada distância de trabalho.

Outra forma de alterar o FOV de um sistema é utilizando uma lente varifocal ou uma lente de *zoom* variável, uma vez que estas permitem o ajuste da sua distância focal e conseqüentemente do FOV do sistema, porém estas lentes possuem algumas desvantagens em termos de dimensão, custo e desempenho, em comparação com lentes de distância focal fixa.

Para sistemas de visão por computador, em que o objetivo recai na captação e medição de objetos que se movimentam ao longo do campo de visão de um sistema ótico, a variação do AFOV resulta em diferentes percepções de profundidade uma vez que, quanto maior a distância entre a lente e o objeto, menor é a ampliação do mesmo. Este efeito ótico pode ser removido através do uso de lentes telecêntricas, uma vez que este tipo de lentes possuem um campo de visão constante e não angular, garantindo sempre o mesmo AFOV a qualquer distância de trabalho. Na Figura 2.12 pode observar-se o comportamento ótico causado pelas diferentes distâncias de trabalho entre dois objetos quando visualizados através de uma lente de distância focal fixa e uma lente telecêntrica.



a) Configuração dos cubos.



b) Imagem captada através de uma lente de distância focal fixa.



c) Imagem captada através de uma lente telecêntrica.

Figura 2.12: Comportamento ótico de dois objetos quando visualizados através de uma lente de distância focal fixa e uma lente telecêntrica [22].

Após a observação da Figura 2.12, é possível concluir que a ampliação de uma lente telecêntrica não varia em relação à profundidade, o que não acontece com a lente de distância focal fixa, uma vez que é possível verificar que ambos os cubos da imagem captada pela lente de distância focal fixa aparentam ser de diferentes tamanhos.

2.1.3.3 Relação entre Abertura da Lente e Profundidade de Campo

Tal como mencionado anteriormente, a profundidade de campo consiste na distância entre o ponto mais próximo e o ponto mais distante em que um objeto mantém uma nitidez aceitável. É de salientar que, conforme a variação da posição de um objeto em relação à distância de focagem, tanto a resolução como o contraste sofrem alterações, resultando numa focagem diferente do objeto na imagem. Uma das formas de alterar a DOF de um sistema é variando a abertura da lente ($F/\#$), tal como é possível observar na Figura 2.13. Na maioria das lentes a abertura é controlada através da rotação de um anel de ajuste da íris, variando o diafragma da mesma no interior da lente, afetando assim a quantidade de luz captada pelo sensor, a profundidade de campo e a capacidade de produzir contraste a uma determinada resolução.

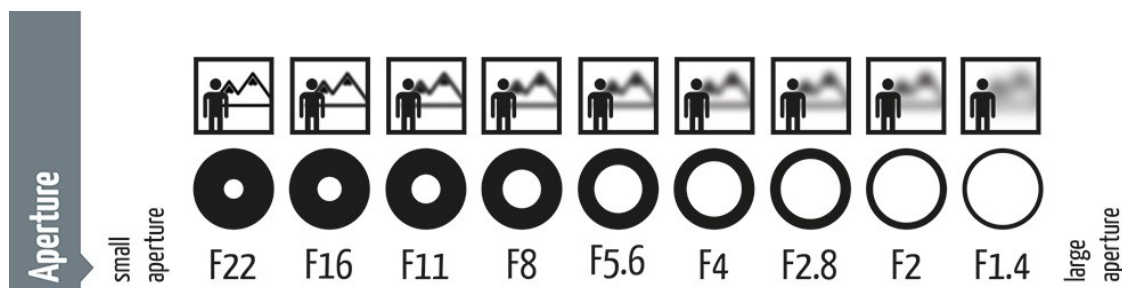


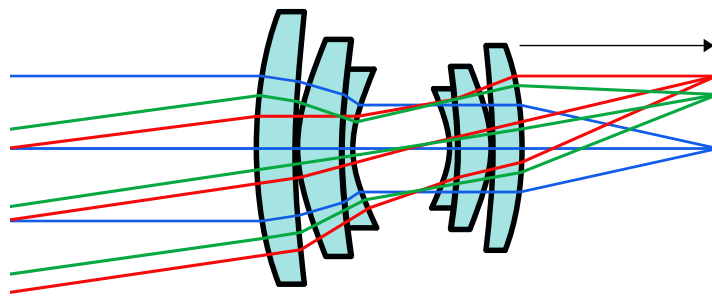
Figura 2.13: Variação da abertura da lente com a profundidade de campo [25].

Assim, é possível concluir que, quanto maior for $F/\#$, menor a abertura do diafragma, o que por sua vez reflete-se numa maior profundidade de campo. Porém, a resolução e a quantidade de luz captada pelo sensor diminuem. Eventualmente, o aumento excessivo do $F/\#$ tem como resultado o desfoque de pequenos detalhes na imagem devido aos limites de difração da lente serem atingidos.

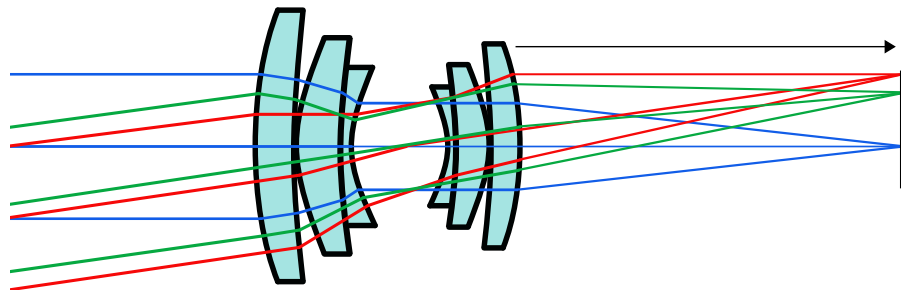
2.1.4 Tipos de Lentes

2.1.4.1 Lentes de Distância Focal Fixa

As lentes de distância focal fixa são lentes que coletam feixes divergentes do eixo ótico e que possuem um AFOV fixo, no entanto, podem focar a diferentes distâncias de trabalho, tal como é possível observar na Figura 2.14. Esta alteração é alcançada ao mover todos os elementos individuais da lente em conjunto, de forma a que o espaçamento relativo entre estes não seja alterado. Geralmente é possível também controlar mecanicamente o diafragma, o que permite efetuar o ajuste manual da abertura da lente ($F/\#$) e, conseqüentemente, da quantidade de luz captada pelo sensor, da profundidade de campo e da resolução.



a) Lente focada a uma distância de trabalho de 100 mm.



b) Lente focada a uma distância de trabalho de 200 mm.

Figura 2.14: Lente de distância focal fixa focada a duas distâncias de trabalho diferentes.

Na Figura 2.14 é possível observar que, embora o espaçamento entre cada elemento não se tenha alterado, à medida que a distância de trabalho varia, a distância entre o plano da imagem e o último elemento da lente varia significativamente.

As lentes de distância focal fixa não são adequadas para todas as aplicações, uma vez que estas geralmente introduzem erros significativos de perspectiva e distorção geométrica que são incompatíveis com aplicações que requerem medidas com elevada precisão. Além disso, o ajuste manual do diafragma e do foco introduzem um ruído mecânico, o que torna essas lentes inviáveis para aplicações que exigem configurações repetíveis.

2.1.4.2 Lentes Telecêntricas

As lentes telecêntricas são lentes concebidas para coletar apenas feixes de luz colimados. Este comportamento ótico é obtido através do posicionamento da pupila de saída no plano focal do grupo ótico frontal, sendo que os raios coletados focam-se na pupila de entrada que se encontra virtualmente posicionada no infinito. Na Figura 2.15 é possível observar o comportamento ótico de uma lente telecêntrica.

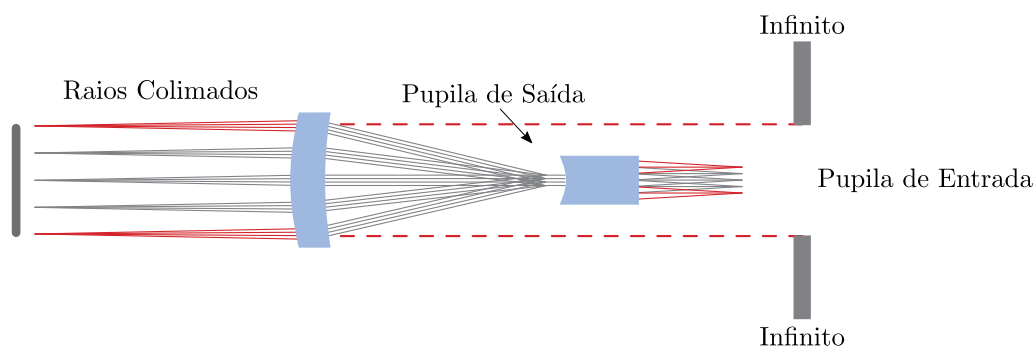


Figura 2.15: Comportamento óptico de uma lente telecêntrica [26].

Uma vez que apenas os raios colimados são aceitos no eixo óptico, a ampliação de uma lente telecêntrica é independente da localização do objeto a captar, tornando estas lentes perfeitamente adequadas para aplicações de medição, onde erros de perspectiva e alterações na ampliação podem levar a medições inconsistentes.

Na Figura 2.16 é possível observar o comportamento de uma lente telecêntrica perante os feixes luminosos.

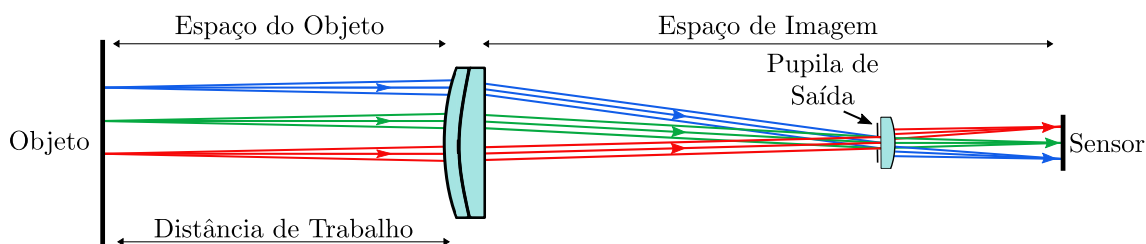


Figura 2.16: Feixes de luz atravessados por um sistema de lente telecêntrica.

Uma demonstração do efeito do erro de perspectiva está presente na Figura 2.12, onde é possível observar o comportamento óptico causado pelas diferentes distâncias de trabalho entre dois objetos quando visualizados através de uma lente de distância focal fixa e uma lente telecêntrica.

2.1.4.3 Lentes Bi-Telecêntricas

As lentes bi-telecêntricas são lentes que apresentam uma *telecentricity*¹ constante, tanto no espaço do objeto como também no espaço de imagem, o que significa que os raios principais são paralelos não apenas ao entrar, mas também ao sair da lente, tal como ilustrado na Figura 2.18. Esta característica é essencial para vencer todos os problemas de precisão relativos às lentes telecêntricas, como a falta de homogeneidade da função de propagação de pontos e a falta de preservação da ampliação.

¹ *Telecentricity* é uma propriedade especial de certos *designs* de lentes multi-elemento nos quais os raios de todos os pontos do objeto ou imagem são colimados.

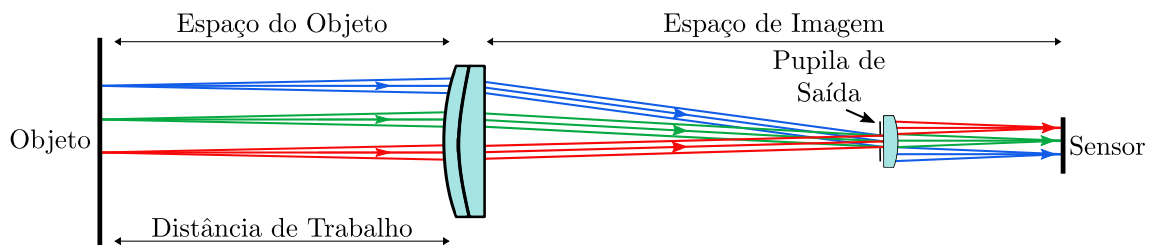
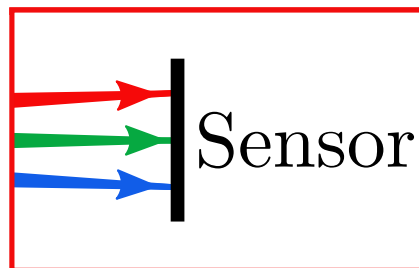


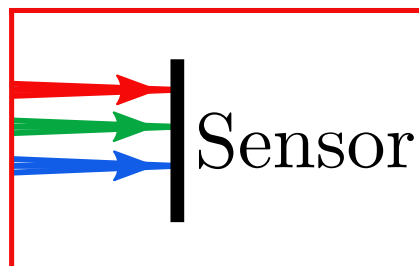
Figura 2.17: Feixes de luz atravessados por um sistema de lente bi-telecêntrica.

Tal como previamente mencionado, as lentes telecêntricas aceitam apenas feixes de luz colimados paralelos ao eixo ótico da lente. Caso a lente seja apenas telecêntrica no espaço do objeto, os raios colimados passam pelo sistema ótico e atingem o sensor com diferentes ângulos, assim como ilustrado na Figura 2.18. Por conseguinte, os pontos gerados pelos raios no plano do sensor mudam de forma e dimensão entre pontos no espaço de imagem, tornando a função de propagação de pontos não simétrica. É também de salientar que, quando o objeto é deslocado, ocorre uma mudança perceptível na ampliação da imagem.

Por este motivo, as lentes telecêntricas apresentam uma constante de ampliação reduzida, apesar de que a sua *telecentricity* quando medida apenas no espaço do objeto apresente características de colimação.



a) Lente telecêntrica.



b) Lente bi-telecêntrica.

Figura 2.18: Comparação dos feixes de luz atravessados pelos diferentes sistema óticos.

2.1.5 Iluminação

No que diz respeito aos diversos métodos de iluminação, existem vários aspetos que devem ser considerados de forma a seleccionar o método que mais se adequa ao sistema de visão utilizado. Na Figura 2.19 é possível observar as diferentes combinações e direções dos diversos métodos de iluminação.

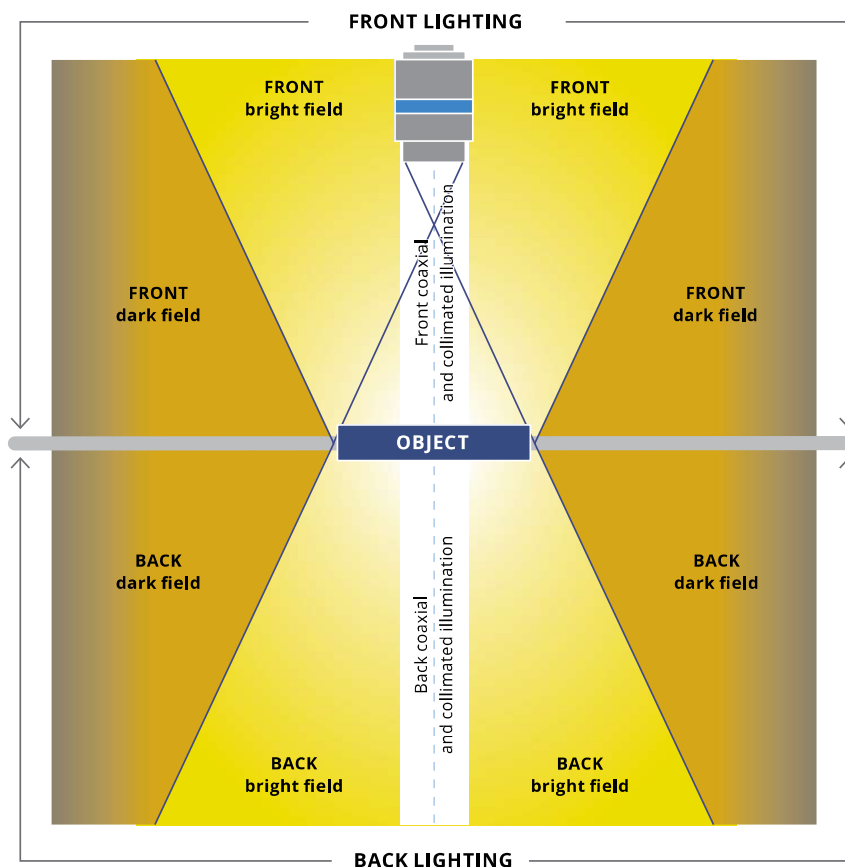


Figura 2.19: Métodos de iluminação [26].

É de salientar que, para sistemas focados na inspeção da superfície de um objeto (isto é, na deteção de defeitos) a iluminação proveniente do lado da câmara (*Front Lighting*) é a que mais se adequa à aplicação. Consoante o material e detalhes específicos da superfície que se pretende destacar, diferentes direções ou ângulos de incidência devem ser considerados, bem como outras propriedades óticas, como a luz difusa ou direta. No caso de sistemas focados na medição de objetos, a iluminação proveniente do lado oposto da câmara (*Back Lighting*) é o que mais se adequa, uma vez que a luz é bloqueada pela passagem do objeto entre o sistema de iluminação e a câmara [26].

A seleção do método de iluminação a utilizar num sistema de visão pode ainda ser mais difícil ao lidar com situações mais complexas, como por exemplo a existência de materiais transparentes, sendo que a utilização de soluções mistas devem ser consideradas.

2.1.5.1 *Front Lighting*

2.1.5.1.1 *Bright Field*

Na iluminação *bright field*, a luz refletida pelo objeto é coletada pela lente. Devido ao ângulo de incidência dos raios luminosos, características como defeitos e arranhões podem fazer dispersar os raios luminosos fora do ângulo máximo de aceitação da lente, o que por sua vez leva a que características escuras sejam apresentadas num fundo claro.

Na Figura 2.20 encontram-se ilustrados as iluminações direcional e difusa utilizadas no método *bright field, front lighting*.

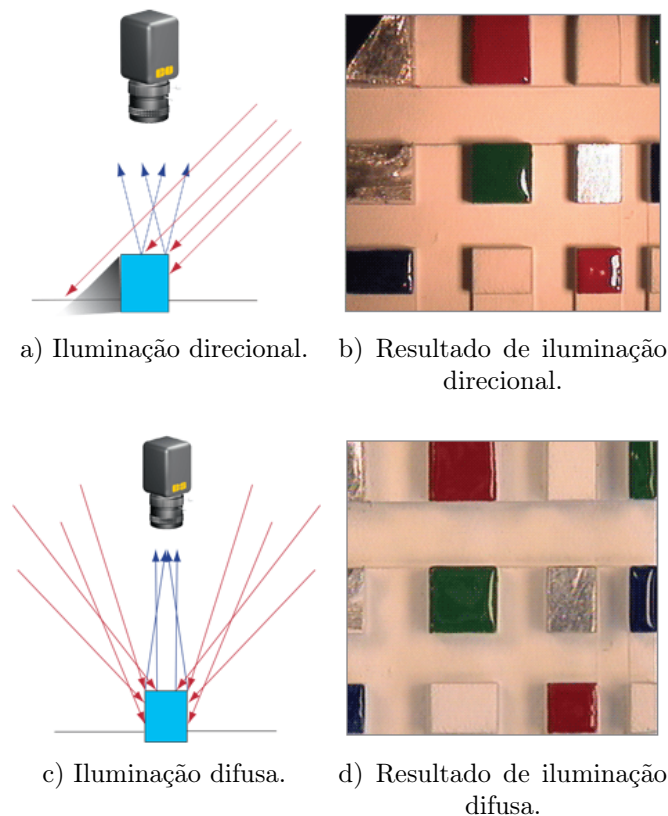


Figura 2.20: Diferentes métodos de iluminação *bright field, front lighting* [22].

Na iluminação direcional, Figura 2.20 b), graças ao ângulo de incidência dos feixes luminosos, a imagem apresenta, em determinadas partes, sombreamento e brilho ofuscante. Para contornar este problema normalmente são utilizados filtros polarizados de forma a reduzir e uniformizar o brilho. Este tipo de iluminação é ideal para aplicações de inspeção e medição de objetos planos.

Na iluminação difusa, Figura 2.20 d), o problema relacionado com o brilho é corrigido devido aos diferentes ângulos de incidência dos feixes luminosos, proporcionando uma iluminação uniforme. Este tipo de iluminação é ideal para aplicações cujos objetos a captar estejam posicionados a elevadas distâncias de trabalho.

Dark Field

Na iluminação *dark field* a luz refletida não é coletada pela lente por causa do ângulo de incidência dos raios luminosos. Desta forma, apenas a luz dispersa pelo objeto é capturada, realçando o brilho das características da superfície num fundo escuro. Na Figura 2.21 encontra-se ilustrado o método *dark field, front lighting*.

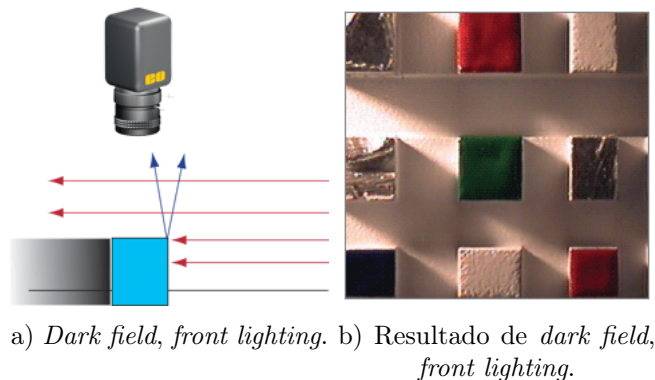


Figura 2.21: *Dark field, front lighting* [22].

No método *dark field, front lighting*, Figura 2.21 b), a imagem sofre de um sombreamento elevado como consequência do ângulo reduzido de incidência dos feixes luminosos. Este tipo de iluminação é utilizado para a identificação de defeitos em objetos com profundidade e verificação de acabamentos de objetos opacos.

2.1.5.2 *Back Lighting*

Bright Field

Na iluminação *bright field*, uma vez que o objeto é iluminado por trás, a imagem captada perde o detalhe da superfície do objeto, contudo esta técnica de iluminação é ideal para a captação da silhueta de um objeto opaco e para aplicações de *edge detection*, ou para a captação de imagens através de objetos transparentes. Na Figura 2.22 encontra-se ilustrado o método *bright field, back lighting*.

Em determinadas aplicações, no método *bright field, back lighting*, pode também ser utilizada a iluminação telecêntrica, ou iluminação colimada. Esta consiste na utilização de um iluminador composto por uma lente ótica capaz de tornar os raios de um feixe luminoso paralelos. Desta forma, o feixe luminoso colimado emitido pelo iluminador permanece colimado mesmo após atingir a superfície do objeto (Figura 2.23 b)), criando uma silhueta de alto contraste. Contudo, o feixe luminoso de um iluminador comum emite feixes que interferem entre si, produzindo reflexões difusas (Figura 2.23 d)).

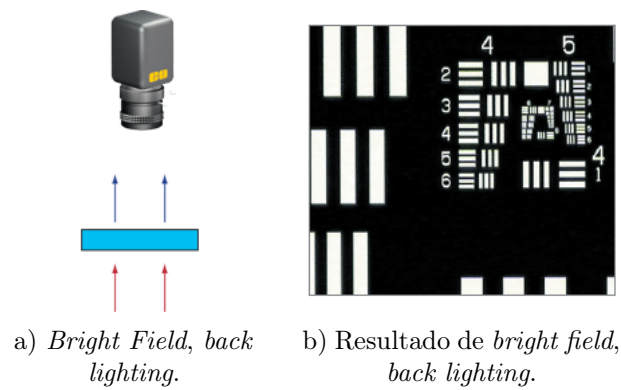


Figura 2.22: *Bright field, back lighting* [22].

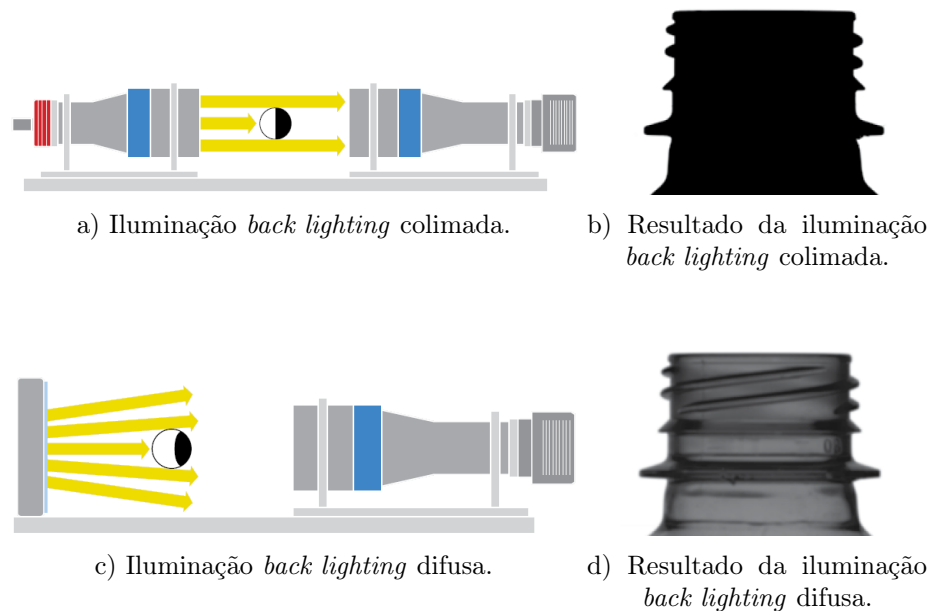


Figura 2.23: Diferença entre a influência da iluminação colimada e a iluminação difusa [26].

A combinação da iluminação colimada com uma lente telecêntrica proporciona ao sistema ótico uma aumento da profundidade de campo da lente telecêntrica de aproximadamente 20 % a 30 % (tendo em consideração diferentes fatores, como por exemplo o tipo de lente e o tamanho do píxel) [26].

Esta técnica de iluminação não só é ideal para a captação da silhueta de um objeto, sendo utilizada para aplicações de *edge detection*, como também para qualquer aplicação que requer medições de elevada precisão.

Dark Field

Na iluminação *dark field*, o objeto é iluminado perpendicularmente à lente. Desta forma, apenas a luz dispersa pelo interior do objeto é capturada, realçando o brilho das características da superfície num fundo escuro. Na Figura 2.24 encontra-se ilustrado o método *dark field, back lighting*.

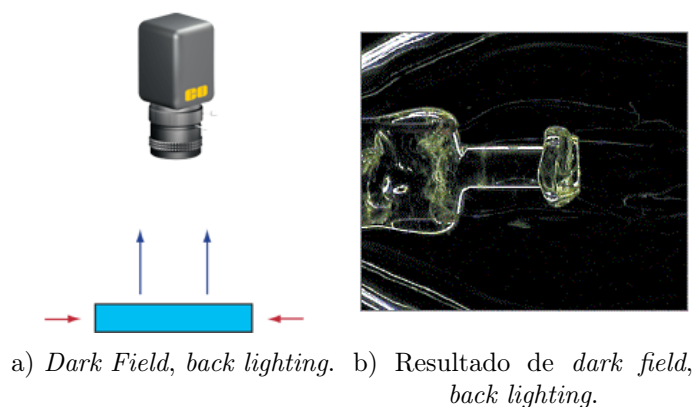


Figura 2.24: *Dark field, back lighting* [22].

No método *dark field, back lighting*, Figura 2.24 b), uma vez que o objeto é iluminado lateralmente, este tem de ser obrigatoriamente transparente ou opaco, de forma a que os feixes luminosos se propaguem no interior do mesmo. Este método de iluminação é ideal para aplicações de inspeção de objetos de vidro ou de plástico.

2.2 Estado da Arte

2.2.1 Introdução

Nesta secção é apresentada uma análise do estado da tecnologia já existente referente ao tema desta dissertação, sendo descritos os aspetos teóricos mais relevantes, a metodologia e as técnicas utilizadas nas diferentes soluções.

Deste modo, esta secção encontra-se dividida em quatro subsecções: Sistemas de Rede de Captação de Plâncton, Sistemas de Aquisição de Imagens de Plâncton, Sistemas de Aquisição Holográfica de Plâncton e Análise Comparativa. Em 2.2.2, 2.2.3 e 2.2.4 são apresentados os três métodos mais conhecidos de captação de plâncton e apresentados os sistemas mais relevantes de cada método, efetuando-se uma breve descrição das suas principais características. Em 2.2.5 é apresentado um sumário dos conteúdos abordados ao longo do capítulo, como também são relatados alguns projetos que não foram mencionados nas secções anteriores. Ao longo desta secção é também efetuada uma análise comparativa entre os diferentes sistemas de cada método.

2.2.2 Sistemas de Rede de Captação de Plâncton

O plâncton é um conjunto de organismos aquáticos que desempenham um papel relevante na caracterização de um ecossistema marinho. Deste modo existe uma grande necessidade de avaliar ecossistemas através do estudo destes organismos, de acordo com a sua taxonomia e abundância, o que torna esta análise ambiental bastante difícil de ser realizada, sendo necessário recorrer a técnicas tradicionais de captação de plâncton que normalmente recaíam na utilização de redes de reboque.

Este tipo de técnica consiste num sistema constituído por uma rede com uma malha de dimensões reduzidas. À medida que o sistema é rebocado, os organismos presentes no ecossistema ficam agarrados à rede, tornando possível, após a recolha do sistema, a entrega destes organismos a um laboratório para posterior classificação e contagem.

O MOCNESS [27], o LHPR [28] e o WP-2 Net [29] representados, respetivamente, são alguns dos sistemas capazes de captar plâncton, através da utilização de redes.

Este tipo de método possui algumas limitações, como por exemplo no momento de instalação da rede, o plâncton de maiores dimensões é capaz de detetar a presença desta, conseguindo evitar a sua captura. Os organismos de dimensões mais reduzidas apresentam uma maior fragilidade, podendo ser destruídos no momento de captura, o que leva a que sejam normalmente captados os organismos mais abundantes de maiores dimensões existentes na zona de captação. Para além disso, estes sistemas apenas realizam análises a uma profundidade reduzida, o que dificulta ainda mais a descoberta de diferentes espécies de plâncton.

Deste modo, o uso destes sistemas é limitado, sendo normalmente utilizados no estudo da distribuição destes organismos em escalas reduzidas. De forma a colmatar algumas desvantagens que estes métodos tradicionais apresentam, novos sistemas baseados neste tipo de técnica são desenvolvidos com o uso de tecnologias inovadoras, permitindo que a classificação e contagem seja realizada *in situ*, removendo por completo a necessidade de laboratórios para pós-processamento, tornando o processo mais rápido e menos dispendioso.

2.2.2.1 *Lightframe On-sight Keyspecies Investigation*

O *Lightframe On-sight Keyspecies Investigation* (LOKI), representado na Figura 2.25, é um sistema capaz de captar imagens de organismos com dimensões inferiores a 100 μm . Este sistema está equipado com uma rede de malha de 200 μm , uma câmara de 1.4 MP, capaz de captar imagens a uma taxa de 15 fps, uma lente de foco fixo de 25 mm e um sistema de iluminação composto por um diodo emissor de luz (LED - *Light-Emitting Diode*), baseado no método *dark field*.

De forma a reduzir a dispersão e o ruído causado pela luz dispersa, é utilizada uma lente de Fresnel² que torna o feixe de luz num feixe de luz colimado, isto é, todos os raios

²Tipo de lente originalmente desenvolvida pelo físico francês Augustin-Jean Fresnel para o uso em faróis de sinalização marítima. Graças aos cortes da lente, estas são mais eficazes em refratar individualmente superfícies, retificando o feixe luminoso e convergindo-o a uma distância focal comum.

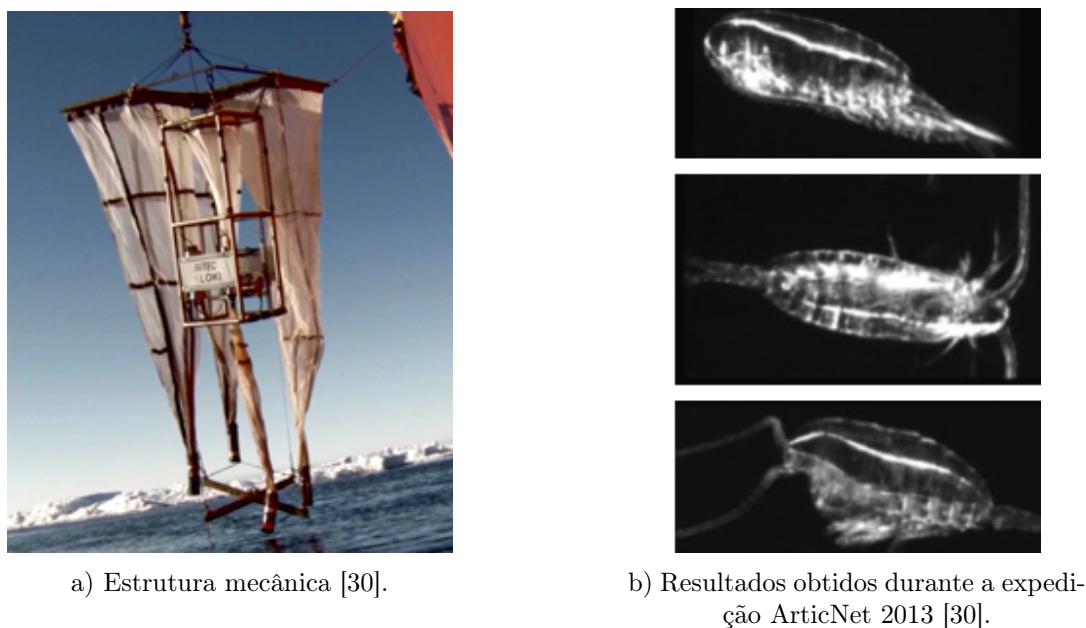


Figura 2.25: *The Lightframe On-sight Keyspecies Investigation*.

do feixe são paralelos entre si [30, 31].

Relativamente aos métodos de processamento de imagem, o LOKI utiliza dois *softwares*: o ZOOMIE (*Zooplankton Multiple Image Exclusion*) [32] e o LOKI browser [33].

O ZOOMIE, desenvolvido em PHP e JavaScript, analisa as imagens adquiridas e remove imagens praticamente idênticas (por exemplo, quando a velocidade de fluxo dentro do canal da câmara é reduzida), garantindo assim que os dados adquiridos sejam representativos da quantidade de plâncton presente no ecossistema. O LOKI browser extrai características das imagens captadas, como por exemplo, tamanho do objeto, circularidade, grau de cinza, homogeneidade, entre outros, e classifica os organismos com base num modelo de *machine learning* utilizando o método de *random forest*³.

2.2.3 Sistemas de Aquisição de Imagens de Plâncton

Apesar de ainda serem desenvolvidos sistemas inovadores baseados no método anteriormente descrito, estes continuam a ser bastante abrasivos no processo de captação e apenas permitem um período reduzido de utilização, uma vez que a sua utilização por longos períodos de tempo leva à sua obstrução.

Deste modo, novos sistemas estão a ser desenvolvidos baseados na captação de imagens de plâncton de forma a fornecer observações de organismos e ecossistemas em pequenas escalas, contribuindo assim para uma melhor compreensão dos principais processos físicos, químicos e biológicos [34, 35].

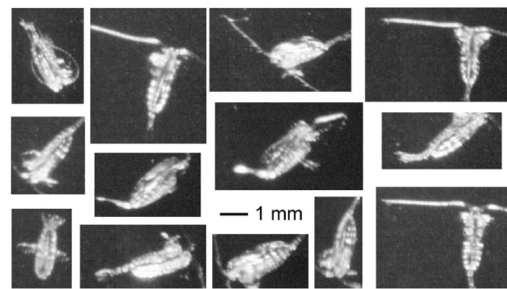
³O *random forest* é um algoritmo de *machine learning* utilizado para tarefas de classificação. Este algoritmo opera através da construção de várias árvores de decisão com base num critério de divisão, sendo a decisão final tomada através da classificação com mais votos.

2.2.3.1 *The Video Plankton Recorder II*

O *The Video Plankton Recorder II* (VPRII), representado na Figura 2.26, é capaz de captar imagens de organismos com dimensões entre 100 μm a 1 cm. Este sistema está equipado com uma câmara de 1 MP, capaz de captar imagens a uma taxa de 30 fps, uma lente de *zoom* ótico manual de 12.5 mm a 75 mm e um sistema de iluminação industrial de 20 W (Hamamatsu L7684), baseado no método *dark field*, sincronizado com a câmara [36].



a) Estrutura mecânica [36].



b) Resultados obtidos durante os testes realizados no Golfo do Maine [36].

Figura 2.26: *The Video Plankton Recorder II*.

O VPRII possui um sistema de reboque que suporta velocidades até aproximadamente 6 m/s, um sistema de estabilidade composto por três servomotores para o controlo do *roll*, *pitch* e *yaw* e um sistema de comunicação de fibra ótica entre o VPRII e o navio de reboque.

Relativamente ao *software* é possível observar na Figura 2.27 o fluxograma do processamento de imagem e exibição de dados implementado no VPRII.

Para processamento de imagem, o VPRII utiliza o *software* Visual Plankton, capaz de realizar o processamento de imagem em tempo real, focalizado na extração de características, classificação de organismos e exibição de dados.

É também utilizado um programa desenvolvido em C++, denominado de VPRdeck, encarregue de ler, exibir e gravar a informação proveniente da embarcação de reboque, como por exemplo, do sistema de posicionamento global (GPS - *Global Position System*). Este programa também possui uma interface gráfica que permite ao utilizador configurar determinados *thresholds*, como por exemplo, brilho, foco, tamanho do objeto, volume de imagem, entre outros.

2.2.3.2 *The Zooplankton Visualization and Imaging System*

O *The Zooplankton Visualization and Imaging System* (ZOOVIS), representado na Figura 2.28, é um sistema capaz de captar imagens de organismos com dimensões entre 40 μm a 1 cm. Este sistema está equipado com uma câmara de 5 MP, capaz de captar imagens a uma taxa de 15 fps, uma lente de *zoom* ótico manual de 28 mm a 300 mm e

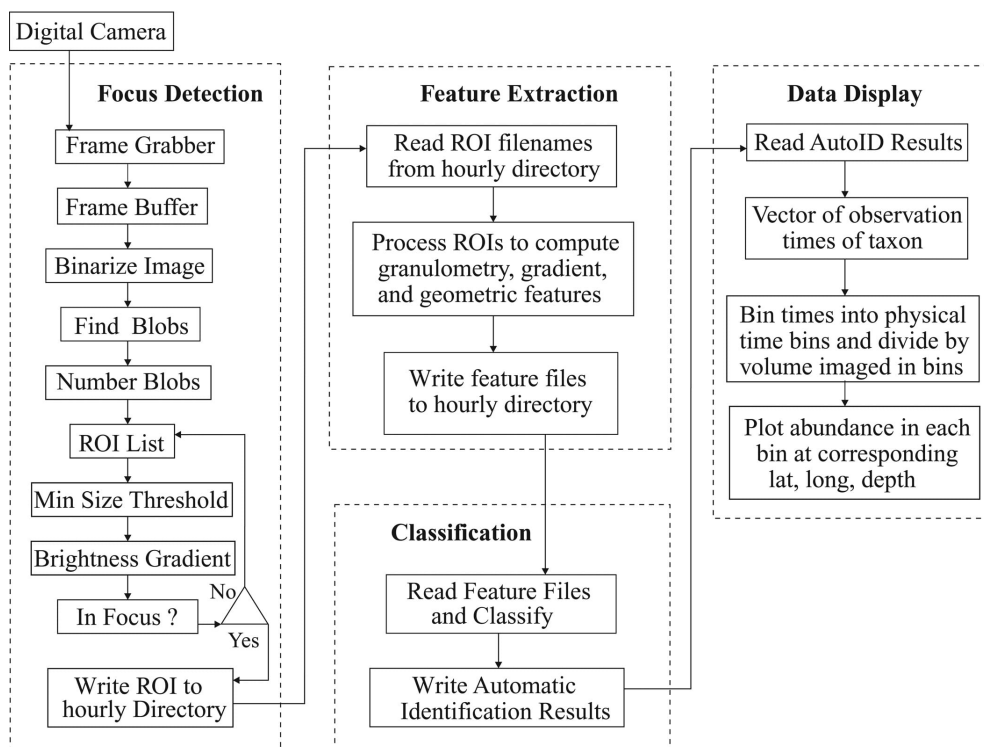
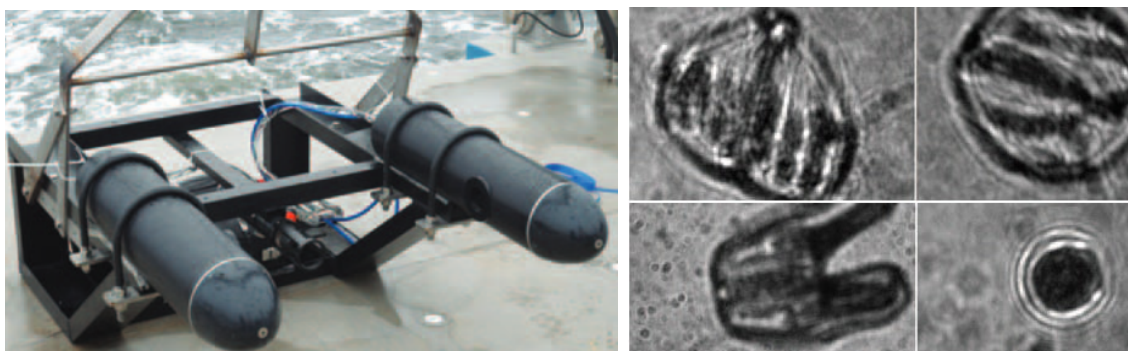


Figura 2.27: Fluxograma do *software* de processamento de imagem e exibição de dados [36].

um sistema de iluminação LED colimado que emite um feixe de luz vermelha com um comprimento de onda de 625 nm [37].



a) Estrutura mecânica [37].

b) Resultados obtidos durante os testes realizados na baía de Chesapeake [37].

Figura 2.28: *The Zooplankton Visualization and Imaging System*.

Relativamente ao processamento de imagem, este encontra-se dividido em quatro etapas, representadas na Figura 2.29, sendo elas: a segmentação das regiões de interesse, a correção de ruído e a classificação.

Tal como se pode observar, no processo de segmentação das regiões de interesse, as

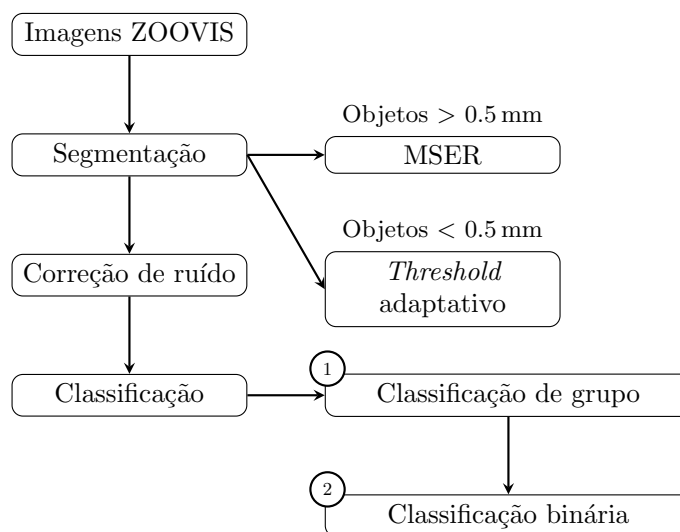


Figura 2.29: Fluxograma do *software* de processamento de imagem do ZOOVIS (adaptado de [38]).

imagens são convertidas em imagens binárias e segmentadas utilizando dois métodos diferentes de *blob detection*⁴: para grandes regiões de interesse é utilizado o *maximally stable extremal regions* (MSER) e para pequenas regiões de interesse é utilizado um método de *threshold* adaptativo, onde cada objeto identificado é delimitado e extraído da imagem para ser utilizado na etapa de correção de ruído. Por fim, de forma a classificar estas imagens, são utilizadas duas etapas de classificação, baseadas em classificadores de máquina de vetores de suporte (SVM - *Support Vector Machine*).

2.2.3.3 GUARD1

O GUARD1, representado na Figura 2.30, é um sistema autônomo de baixo custo, capaz de analisar organismos com dimensões entre 50 μm a 100 cm. Este é composto por uma câmara CANON PowerShot G1X de 12.8 MP e por um sistema de iluminação LED com uma potência de 1 W [39, 40].

Este sistema apresenta algumas mais-valias, como, por exemplo, a versatilidade da estrutura em que é instalado e a possibilidade de alteração do *firmware* da câmara através do uso do *firmware Canon Hack Development Kit* (CHDK) [41], que permite o controlo de vários parâmetros, como diferentes valores de sensibilidade (ISO), tempo de exposição, distância focal, abertura, entre outros.

Na Figura 2.31 está representada a arquitetura do GUARD1, que é composta por seis módulos: potência, controlo, comunicação, unidade central de processamento (CPU - *Central Process Unit*), câmara e iluminação.

⁴O método *blob detection* é um método aplicado em visão computacional que se foca em detetar regiões em imagens que diferem em determinadas propriedades quando comparadas com regiões próximas, como por exemplo, iluminação ou cor. O método mais comum para *blob detection* é a convolução.

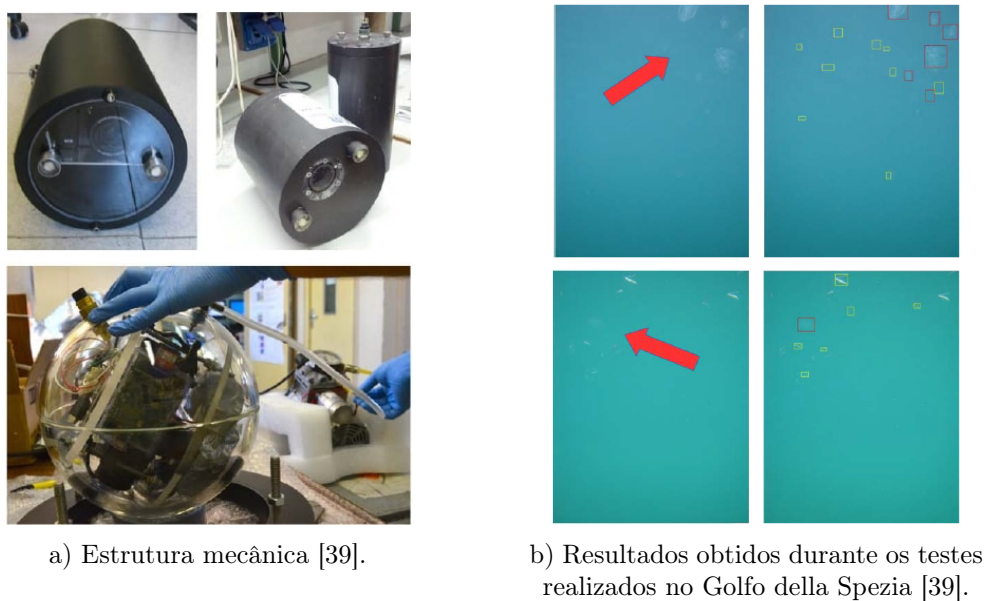


Figura 2.30: O GUARD1.

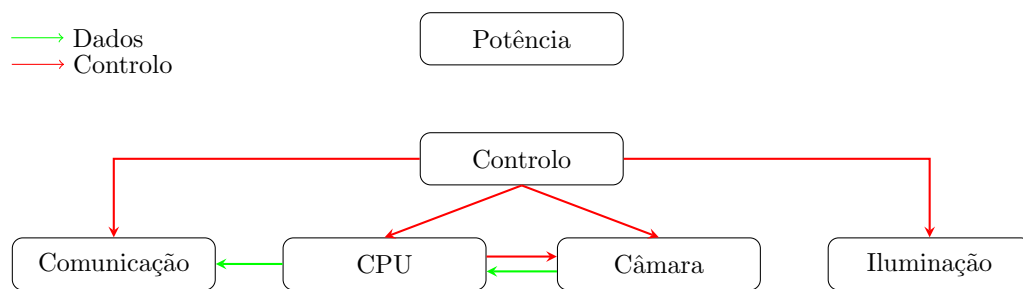


Figura 2.31: Arquitetura do sistema GUARD1 (adaptada de [39]).

- Câmera: controlo de diversos parâmetros, de acordo com o contexto em que o sistema se encontra, através de um *script* desenvolvido em LUA e executado no CHDK;
- Iluminação: os conjuntos de LEDs são controlados conforme a informação recebida do módulo de controlo, que deteta a luz ambiente através de um sensor de luz, ativando e desativando o sistema de iluminação conforme necessário;
- CPU: realiza todo processamento, recebe os dados do sistema de aquisição e executa algoritmos de processamento de imagem;
- Comunicação: troca de informação com veículos submersos através de comunicação acústica e comunicação por radiofrequência para o envio de dados para a estação via *General Packet Radio Service* (GPRS) ou satélite;
- Controlo: permite o acesso remoto ao sistema para alteração de parâmetros da missão, assim como o controlo de todos os outros módulos;
- Potência: monitoriza o consumo de energia do sistema.

O GUARD1 utiliza um *software* de extração de características e reconhecimento de

imagem descrito em [42]. Neste processo são utilizados três algoritmos baseados em regularização de Tikhonov, máquina de vetores de suporte e programação genética (GP - *genetic programming*) para o reconhecimento de plâncton. Os três métodos realizam o reconhecimento de imagem utilizando um conjunto reduzido de características, de forma a otimizar o desempenho e o custo computacional. Os três métodos foram validados numa estrutura de validação cruzada baseada num conjunto de imagens conhecidas. Após a tarefa de reconhecimento, as informações relevantes extraídas das imagens são armazenadas para serem transmitidas ou extraídas após a recuperação do instrumento.

2.2.3.4 *Scripps Plankton Camera System 2*

O *Scripps Plankton Camera System 2* (SPC2) é um sistema autónomo de aquisição e classificação de imagens *in-situ* de micro-organismos aquáticos com dimensões entre 0.5 mm a 5 mm. Desenvolvido pela Scripps Institution of Oceanography, este é composto por uma câmara de 9 MP, uma lente telecêntrica de ampliação de $0.508\times$ e um sistema de iluminação LED composto por um *setup* ótico baseado no método *bright field, back lighting* [43].

O SPC2 está equipado com uma unidade de processamento Odroid XU3, encarregue de controlar o sistema e de executar o *software* de processamento de imagem [44] e gestão de dados. Para isso, é utilizado o *software* de gestão de dados SPCView [45], que permite ao utilizador, através de um servidor *web*, visualizar as imagens adquiridas de forma interativa, assim como consultar vários parâmetros estatísticos.

2.2.3.5 *Continuous Particle Imaging and Classification System*

O *Continuous Particle Imaging and Classification System* (CPICS), representado na Figura 2.33, é um sistema autónomo de aquisição e classificação de imagens *in-situ* de

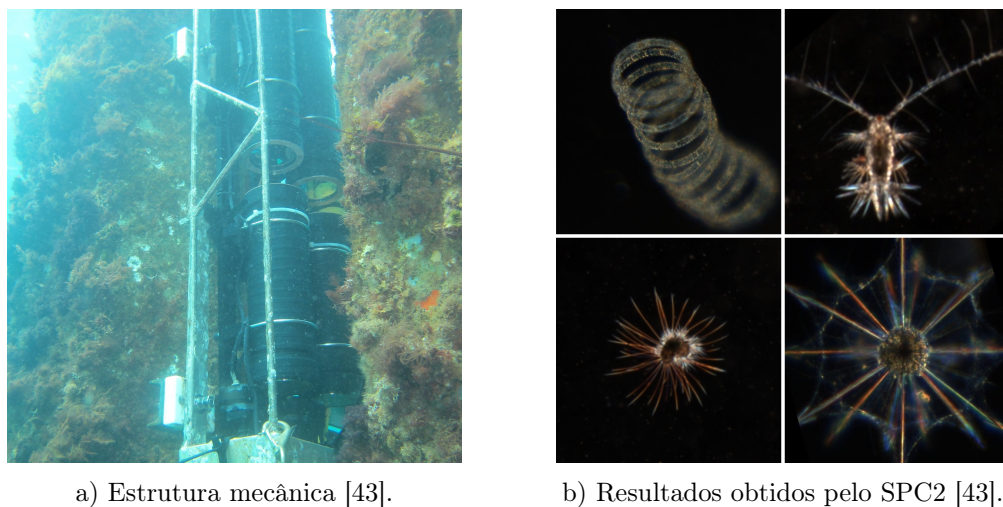
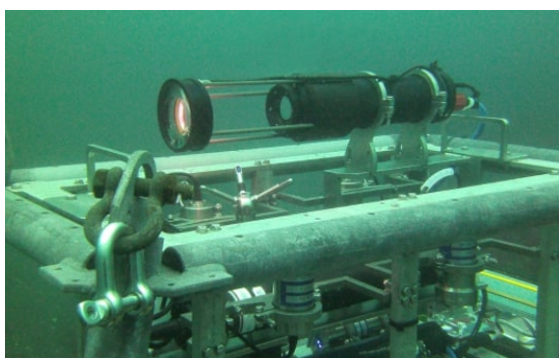


Figura 2.32: *Scripps Plankton Camera System 2*.

micro-organismos aquáticos com dimensões entre 40 μm a 12 mm. Desenvolvido pela Coastal Ocean Vision, este é capaz de captar imagens a cores de alta resolução e realizar processamento de imagem, fornecendo um fluxo contínuo de dados relativos à classificação de organismos e partículas, como, por exemplo, dimensão, volume, forma, entre outros. O sistema possui uma câmara de 6 MP capaz de captar imagens a uma taxa de 10 fps, e um sistema de iluminação, baseado no método *dark field, back lighting*. Este sistema de iluminação tem um conjunto de LEDs de diferentes comprimentos de onda de forma a ser possível escolher qual a melhor iluminação em função do ambiente em análise [46].



a) Estrutura mecânica [47].



b) Resultados obtidos pelo CPICS [48].

Figura 2.33: *The Continuous Particle Imaging Classification System*.

O CPICS está equipado com uma unidade de processamento Nvidia Jetson TX1, encarregue de controlar o sistema e de executar o *software* de processamento de imagem e gestão de dados. Para isso, o CPICS utiliza o *software* de classificação ROIclass [49] para o processamento de imagem e o *software* de gestão de dados ROI-Manage [50] para possibilitar o acesso ao utilizador das imagens *raw*, *training sets*, resultados de classificações, entre outros parâmetros.

Relativamente ao *software* é possível observar na Figura 2.34 as etapas do processamento de imagem realizadas no computador de bordo do CPICS.

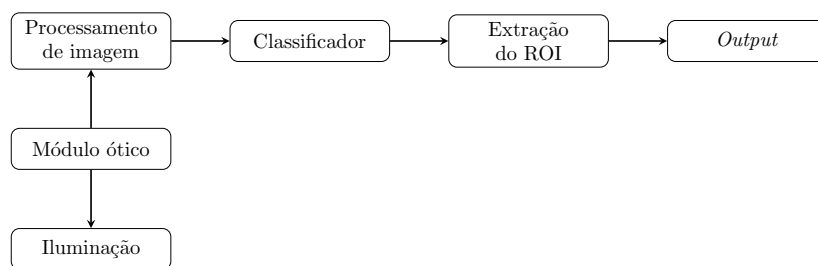


Figura 2.34: Arquitetura do processamento de imagem do CPICS (adaptado de [46]).

Para a classificação é utilizado o ROIclass, este é um classificador baseado em *deep convolutional neural networks*, *support vector machines* e *random forests*. Para a realização do processamento, as imagens adquiridas são transmitidas para uma *pipeline*, onde são

realizadas as correções nas imagens, como, por exemplo, a descodificação de cor, correção de cor, normalização de iluminação, extração da região de interesse (ROI - *Region of Interest*), entre outros requisitos. De seguida, estas imagens são analisadas para verificar a presença de organismos recorrendo a um conjunto de critérios específicos, utilizando métodos como *blob detection*, *brightness threshold* e *in-focus threshold*. Após a identificação de um organismo, este é marcado com uma caixa delimitadora e processado. Isto habilita a possibilidade de extração de características como a textura, cor, morfologia, forma e volume a fim de permitir a classificação do alvo detetado.

2.2.3.6 *The Underwater Vision Profiler 5*

O projeto *The Underwater Vision Profiler 5* (UVP5), representado na Figura 2.35, é um sistema capaz de adquirir imagens de plâncton com dimensões entre 100 μm a 10 cm. Este está equipado com uma câmara de 1.3 MP, uma lente de foco fixo de 9 mm e um sistema de iluminação LED que emite um feixe colimado de luz vermelha com um comprimento de onda de 625 nm. De forma a reduzir a contaminação luminosa não proveniente do sistema de iluminação, o UVP5 utiliza na lente um filtro de comprimento de onda do tipo passa-baixo com corte a 625 nm [51].

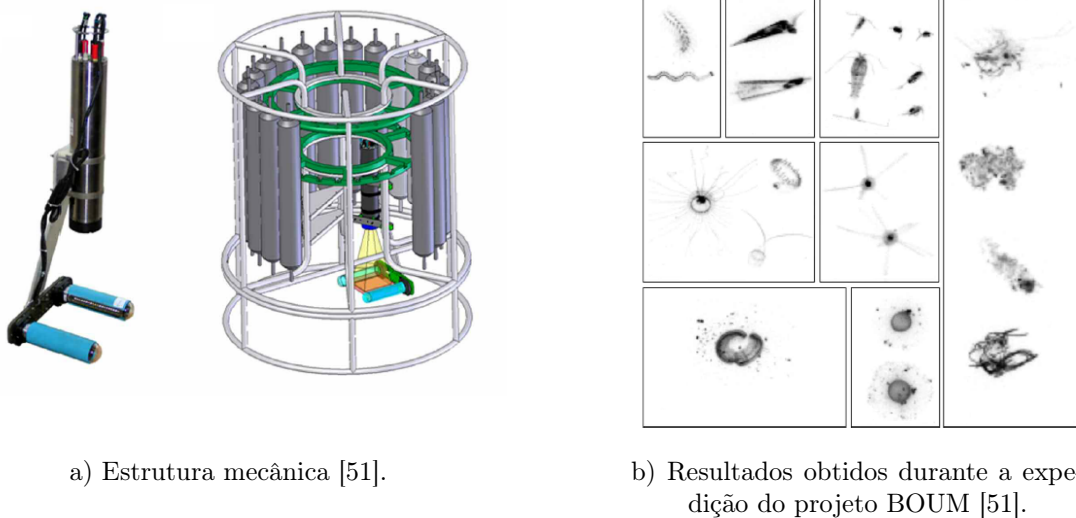


Figura 2.35: *The Underwater Vision Profiler 5*.

Relativamente ao processamento de imagem, o UPV5 utiliza um *software* para processamento de imagem em tempo real e outro para pós-processamento de imagem.

O *software* de processamento de imagem em tempo real interage diretamente com a câmara e com o sistema de iluminação, sendo capaz de controlar determinados parâmetros de forma a obter o máximo proveito do sistema, tais como o ganho, a velocidade do *shutter*, o *trigger* para o pulso dos LEDs, entre outros.

Este *software* está dividido em quatro modos de operação:

- *full process*: as imagens adquiridas são armazenadas e processadas em tempo real, com uma taxa de aquisição limitada a 3 fps;
- *image acquisition only*: apenas é realizada a aquisição de imagens com a possibilidade de estas serem guardadas ou na memória da câmara (reduzindo o consumo de energia) ou diretamente no disco rígido, com uma taxa de aquisição limitada a 3.5 fps;
- *mixed process*: as imagens são adquiridas e processadas de modo a obter o tamanho e o grau de cinza de cada objeto, sendo armazenadas para futuro processamento. Neste modo a taxa de aquisição é limitada a 5.5 fps;
- *process only*: nenhuma das imagens adquiridas é guardada, sendo apenas armazenado num ficheiro de texto o tamanho e o grau de cinza de cada objeto, com uma taxa de aquisição limitada a 6 fps.

No *software* de pós-processamento de imagem é utilizada a *toolbox Zooprocess*, pertencente ao *software ZooScan* [52]. Este analisa as imagens armazenadas e extrai os objetos e dados relacionados durante a aquisição da imagem, como, por exemplo, a profundidade. Este *software* também realiza os melhoramentos necessários para as imagens serem enviadas para o *software* de identificação, denominado de *Plankton Identifier* [53], que utiliza o método de *random forest*, descrito em [54].

2.2.3.7 *In Situ Ichthyoplankton Imaging System*

Uma das desvantagens comum a todos os sistemas anteriormente referidos é o reduzido volume de água analisado, o que restringe a quantificação de plâncton de grandes dimensões. De modo a colmatar o problema referido, foi desenvolvido o *In Situ Ichthyoplankton Imaging System* (ISIIS), representado na Figura 2.36, capaz de analisar grandes volumes de água com elevada resolução, permitindo a quantificação de diferentes organismos. Este sistema está equipado com uma câmara *line scan* com uma resolução de 2048 píxeis, uma lente de 85 mm e um sistema de iluminação LED que emite um feixe colimado de luz azul com um comprimento de onda de 455 nm [55].

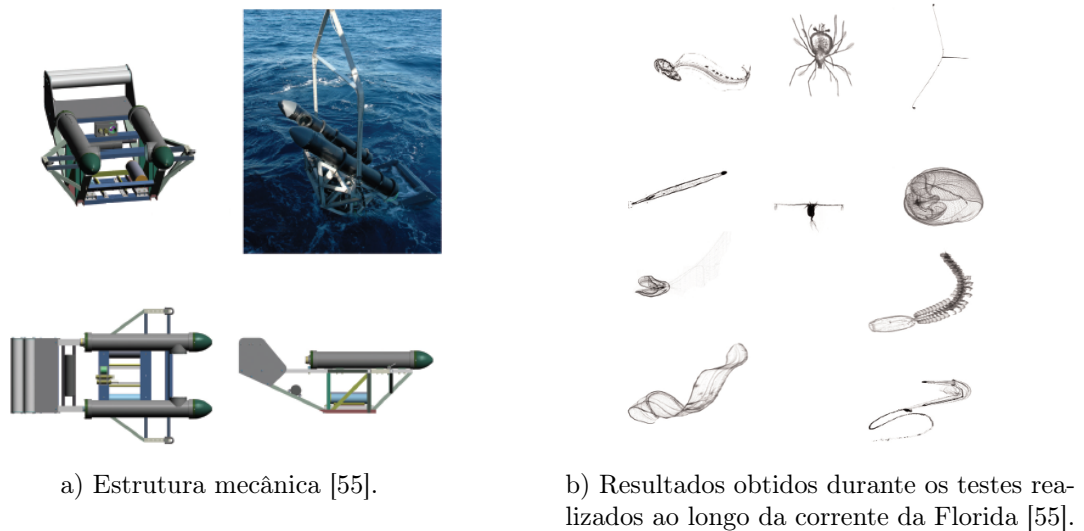


Figura 2.36: *In situ ichthyoplankton imaging system*.

Para a captação de uma imagem completa são conjugadas várias aquisições de linhas (*line scan*), à medida que o objeto a ser captado se move perpendicularmente ao eixo de varrimento do sistema. A resolução de imagem neste sistema é imposta pelo sensor de *line scan* da câmara, pela taxa de aquisição, pelo campo de visão a ser captado e pela velocidade de reboque do sistema.

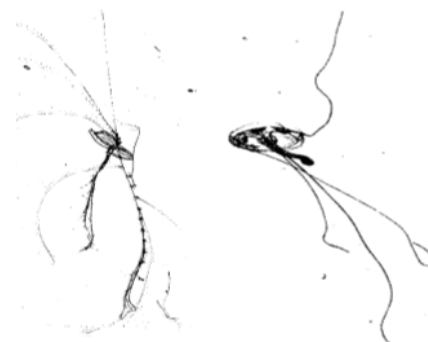
Relativamente a métodos de processamento de imagem, o ISIIS utiliza um *software* dedicado [56], dividido em três partes. Em primeiro lugar, a imagem adquirida passa por um processamento de baixo nível, onde são aplicados algoritmos de segmentação, de modo a extrair objetos. De seguida, as imagens são processadas de forma a representar cada objeto como um vetor de características, tais como a forma, o histograma, a solidez, entre outros. Por fim, é aplicado um conjunto de métodos de *machine learning*, baseado em classificadores de SMV, de forma a escolher quais dos objetos extraídos das imagens corresponde a um organismo e assim realizar a sua identificação.

2.2.3.8 *The Shadowed Image Particle Profiling Evaluation Recorder*

O *The Shadowed Image Particle Profiling Evaluation Recorder* (SIPPER) [57, 58], representado na Figura 2.37, é um sistema que também utiliza câmaras *line scan* para a aquisição de imagens e permite efetuar análises de grandes volumes de amostras. Este sistema está equipado com duas câmaras *line scan*, uma com uma resolução de 4096 píxeis e outra com uma resolução de 2048 píxeis, colocadas perpendicularmente entre si, com dois sistemas de iluminação baseado em tecnologia *light amplification by stimulated emission of radiation* (LASER), que emitem um feixe de luz vermelha com um comprimento de onda de 635 nm e uma lente com uma distância focal de 28 cm, que transforma o feixe luminoso num feixe pseudo-colimado com 1 mm de espessura e 10 cm de largura.



a) Estrutura mecânica [59].



b) Resultados obtidos durante os testes realizados no Golfo do México [57].

Figura 2.37: *The Shadowed Image Particle Profiling Evaluation Recorder*.

Graças ao método de iluminação utilizado, o SIPPER possui duas grandes vantagens em relação a sistemas com iluminação difusa. A primeira recai numa profundidade de campo superior comparativamente a outros esquemas convencionais de imagem, e a segunda numa menor quantidade de luz necessária para a iluminação da amostra. Uma outra vantagem deste sistema é o uso de um *field-programmable gate array* (FPGA), onde é aplicado um *threshold* em tempo real, reduzindo os requisitos de pós-processamento.

2.2.4 Sistemas de Aquisição Holográfica de Plâncton

Os sistemas de captação de imagens de plâncton apresentam vantagens quando equipados a métodos que utilizam redes de captação. Estes sistemas óticos têm a capacidade de obter amostras destes organismos em duas dimensões, permitindo a sua classificação e contagem. Contudo, novos métodos baseados em holografia são hoje em dia utilizados em laboratório para possibilitar o estudo de organismos marinhos *in situ*. Estes apresentam características inovadoras, como, por exemplo, a capacidade de capturar imagens de alta resolução, preservando a distribuição espacial relativa em três dimensões.

Os primeiros sistemas holográficos eram tipicamente compostos por câmaras que utilizavam uma fita para a captação das imagens. Após terminada a missão, estas teriam de ser reveladas em laboratório através do uso de químicos.

Dois exemplos de sistemas que utilizam esta técnica de captação de imagens holográficas são: o *Submersible Holographic Camera* (HoloCam) [60] e o *The Submersible Holocamera* [61, 62], representados na Figura 2.38. Estes sistemas estão equipados com uma câmara holográfica e um sistema de iluminação LASER, cujo feixe luminoso é normalmente um feixe colimado com um comprimento de onda entre 532 nm a 690 nm. Estes sistemas apresentam algumas desvantagens, como, por exemplo, o pós-processamento associado à revelação das imagens e o limite que estas fitas impõem na taxa de aquisição e no número de hologramas capturados.

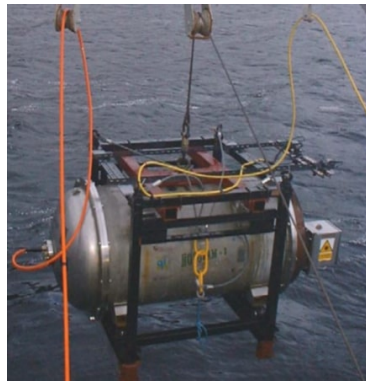
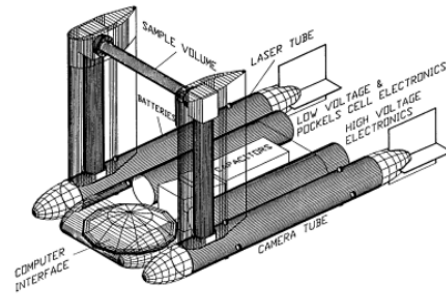
a) *The Holographic Camera* [60].b) *The Submersible Holocamera* [62].

Figura 2.38: Sistemas aquisição de imagens holográficas de plâncton.

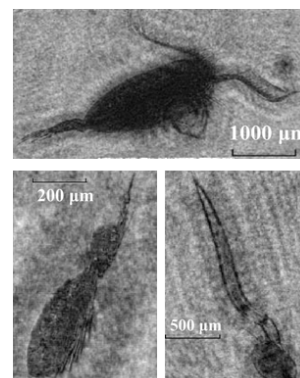
De forma a colmatar estas limitações, foram desenvolvidos novos sistemas baseados na utilização de câmaras digitais, capazes de captar imagens e vídeos holográficos. Esta captura consiste essencialmente na retroiluminação do volume de amostra com um feixe de luz coerente⁵ e colimado (normalmente um sistema de iluminação LASER) e, de seguida, na captação dos padrões resultantes da interferência causada pela passagem dos objetos pelo volume de amostragem num sensor.

2.2.4.1 *Electronic Holographic Camera*

O *Electronic Holographic Camera* (eHoloCam), representado na Figura 2.39, é um sistema de aquisição de imagens holográficas de plâncton que utiliza uma câmara digital de 6.6 MP, capaz de captar imagens a uma taxa de 25 fps, e um sistema de iluminação LASER, que emite um feixe colimado com um comprimento de onda de 532 nm [63, 64, 65].



a) Estrutura mecânica [63].



b) Resultados obtidos pelo eHoloCam [63].

Figura 2.39: *The Electronic Holographic Camera*.

⁵Um feixe de luz coerente é um feixe formado por ondas que possuem a mesma frequência e direção, mantendo assim uma relação de fase constante entre si.

A reconstrução holográfica é realizada por computador através do uso de um algoritmo de reconstrução numérica. Desta forma é possível identificar várias espécies de organismos e partículas, obtendo-se informações relativas à sua concentração, distribuição e orientação.

2.2.4.2 *The Free-Drifting Submersible Digital Holographic Imaging System*

O *The Free-Drifting Submersible Digital Holographic Imaging System* (HoloSub), representado na Figura 2.40, é um sistema de aquisição de imagens holográficas composto por duas câmaras de 4 MP, capazes de atingir uma taxa de aquisição de 15 fps, e por um sistema de iluminação LASER, que emite um feixe de luz colimado com um comprimento de onda de 660 nm [66, 67].

Uma das suas vantagens deve-se ao sistema *free drifting* e *drag-generating*, que permite que o sistema de aquisição se desloque a uma velocidade reduzida em relação ao volume de amostra, minimizando também a perturbação causada pela sua deslocação. Assim, duas estruturas foram instaladas nas laterais das torres, de forma a que estejam à mesma altura e alinhadas perpendicularmente ao volume de amostra.

Relativamente à reconstrução holográfica, esta é realizada através da utilização de algoritmos de reconstrução numéricos, detalhados em [68, 69], que fornecem imagens detalhadas em qualquer um dos planos desejados, dentro do volume de amostra.



a) Estrutura mecânica [67].

b) Recortes 2D dos resultados obtidos pelo HoloSub [67].

Figura 2.40: *The Free-Drifting Submersible Digital Holographic Imaging System*.

2.2.4.3 The Digital in-line Holographic Microscope

O *The Digital in-line Holographic Microscope* (DIHM), representado na Figura 2.41, é outro sistema de aquisição de imagens holográficas composto por uma câmara de 4.2 MP, capaz de atingir uma taxa de aquisição de 7 fps, e por um sistema de iluminação LASER, que emite um feixe de luz colimado com um comprimento de onda de 640 nm [70].

O DIHM é o primeiro sistema holográfico capaz de atingir profundidades até 6 km com uma velocidade de descida de 1 m/s. O sistema é capaz de realizar uma aquisição de 7000 hologramas e analisar um volume de amostra de 12.6 L/s por cada 1 km percorrido.

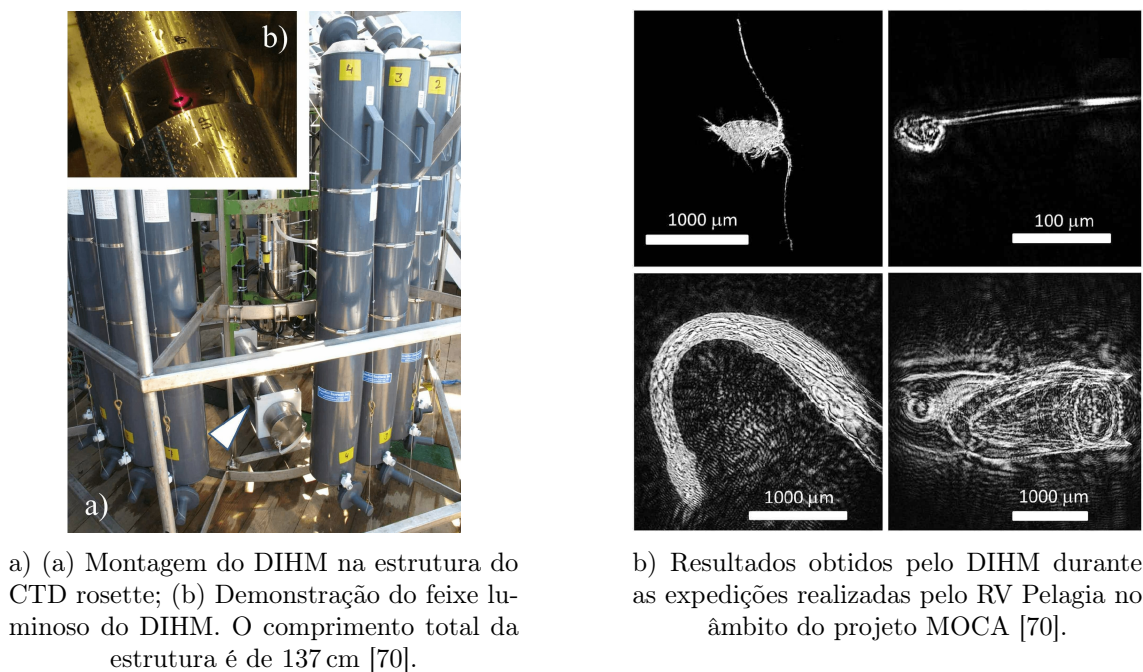
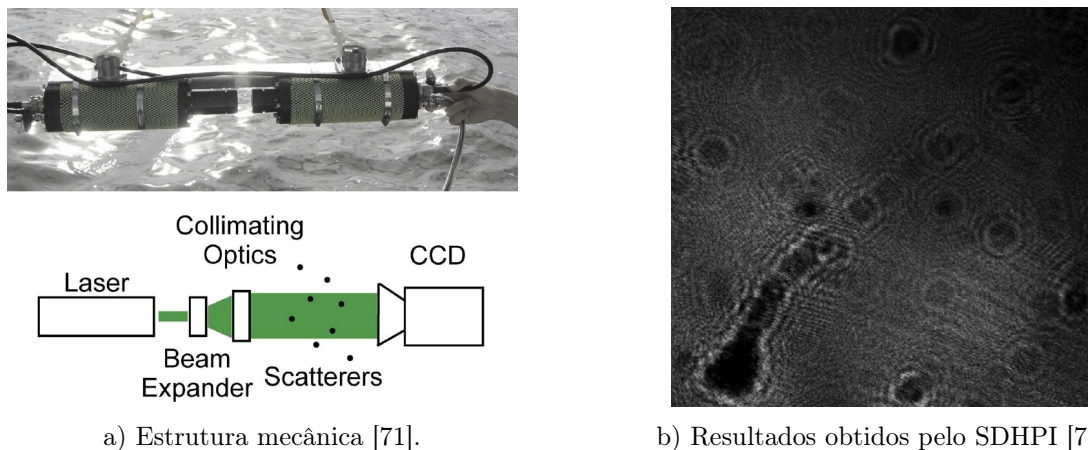


Figura 2.41: *The Digital in-line Holographic Microscope*.

Para a reconstrução de hologramas, o DIHM utiliza o *software* Hologuite. Inicialmente, para que a reconstrução seja realizada da forma mais precisa possível, é necessário que determinadas configurações sejam introduzidas no *software*, como, por exemplo: tamanho do píxel, resolução da câmara, tamanho do sensor, comprimento de onda e respectivos índices de refração. De seguida, este percorre os hologramas em incrementos de 1 mm ou 2 mm e, sempre que seja detetado um objeto com maior detalhe, o incremento é reduzido para 0.1 mm, de forma a obter uma maior resolução do objeto. Para acelerar o processo é utilizada uma placa gráfica (GeForce GTX 560 Ti) que permite uma reconstrução até 7 imagens por segundo.

2.2.4.4 *The Submersible Digital Holographic Particle Imager*

O *The Submersible Digital Holographic Particle Imager* (SDHPI), representado na Figura 2.42, é outro sistema de aquisição de imagens holográficas de plâncton, composto por uma câmara de 1 MP, capaz de atingir uma taxa de aquisição de 25 fps, e por um sistema de iluminação LASER, que emite um feixe de luz colimado com um comprimento de onda de 532 nm [71].



a) Estrutura mecânica [71].

b) Resultados obtidos pelo SDHPI [71].

Figura 2.42: *The Submersible Digital Holographic Particle Imager*.

Relativamente à reconstrução holográfica, esta é baseada numa simplificação do método de convolução. De forma a obter uma boa eficiência computacional, são utilizadas transformadas de Fourier ao longo do eixo z do volume de amostragem para a criação da imagem final.

O *software* de seguimento utiliza *inputs* de hologramas e determinados parâmetros definidos pelo utilizador, tais como o número de *frames* e o número de planos de reconstrução a processar. Este *software* é dividido em duas etapas autónomas: primeiro é realizada a deteção, autofocus e dimensionamento de cada objeto em cada holograma e, de seguida, são criadas as trajetórias para cada um dos objetos detetados automaticamente.

2.2.5 Análise Comparativa

Após a apresentação e análise dos diferentes métodos de captação e dos sistemas em que estes são aplicados, apresenta-se uma análise comparativa onde são enumeradas algumas vantagens e desvantagens entre os diferentes métodos de captação e sistemas. Entre cada método de captação descrito é apresentada uma organização dos sistemas de acordo com o *hardware* utilizado, uma vez que neste tipo de aplicação a qualidade da amostra adquirida depende principalmente do sistema de aquisição de imagem e do sistema de iluminação utilizados. É também realizado um breve resumo dos sistemas apresentados de acordo com: dimensões da amostra, volume de imagem, tamanho do píxel, câmara, iluminação e *software* de classificação utilizado.

Assim, no que diz respeito a sistemas de captação de rede de plâncton, constata-se que estes não só exigem recursos operacionais consideráveis como também são propícios à versatilidade de amostra no momento de captura devido aos fatores anteriormente referidos. Graças à conjugação de novas tecnologias com este método de captação, novos sistemas são desenvolvidos tornando-se capazes de realizar classificação e contagem *in situ*, colmatando assim uma das grandes desvantagens associadas a este método de captação. Porém, este continua a ser bastante abrasivo e limitado, sendo poucos os sistemas que o utilizam.

Em aplicações de aquisição de imagens de plâncton, para além das câmaras industriais de alta resolução utilizadas, são também utilizadas câmaras de *line scan* de forma a contornar algumas limitações, como, por exemplo, o reduzido volume de amostragem que as câmaras industriais de alta resolução apresentam.

Assim, os sistemas como o ISIIS (2.2.3.7) e o SIPPER (2.2.3.8) foram desenvolvidos de forma a contornar este problema. Como estão equipados com câmaras de *line scan*, estes sistemas são capazes de obter elevados volumes de amostragem quando comparados com sistemas como o VPRII (2.2.3.1), o UVP5 (2.2.3.6) e o CPICS (2.2.3.5). Contudo, este tipo de câmaras são propícias a perturbações, uma vez que a aquisição de imagem é realizada linha a linha, sendo necessário o uso de algoritmos de correção de imagem apropriados, que tenham em consideração parâmetros como a velocidade de reboque e a taxa de aquisição.

Relativamente aos sistemas de iluminação, alguns dos sistemas apresentados tentam minimizar determinados problemas relacionados com as influências de efeitos óticos e luminosos causados pela água [72].

O ZOOVIS (2.2.3.2), o UVP5, o ISIIS e o SIPPER são sistemas que utilizam um conjunto de lentes capazes de tornar o feixe de luz num feixe colimado. Esta modificação nos raios do feixe luminoso permite obter uma iluminação mais definida do objeto em análise, uma vez que a dispersão dos raios é reduzida. Na Figura 2.43 é possível observar as diferenças entre a utilização de um sistema de iluminação padrão e um sistema de iluminação colimado.

Para além destas alterações, sistemas como o UVP5 e o CPICS introduzindo melhorias adicionais. No caso do UVP5, este utiliza filtros nas lentes que permitem apenas a passagem do comprimento de onda emitido pelo sistema de iluminação, removendo a contaminação causada pela iluminação exterior. Relativamente ao CPICS, este tira proveito da tecnologia LED, de forma a tornar possível a troca entre diferentes comprimentos de onda, que geram diferentes feixes de luz primários, adequando assim a aquisição de imagens ao ambiente em que os organismos se encontram.

Considerando que o principal objetivo dos sistemas apresentados recai na realização de missões de longo prazo para o estudo de um determinado ecossistema, é de salientar que a introdução de um objeto externo nesse ecossistema será um alvo a efeitos biológicos, efeitos estes como por exemplo a incrustação biológica, conhecida também como bioincrustação.

A bioincrustação é um fenómeno natural que geralmente aparece nas formas de micro e macro incrustações, visíveis em certas superfícies, tais como rochas. Na Figura 2.44 é

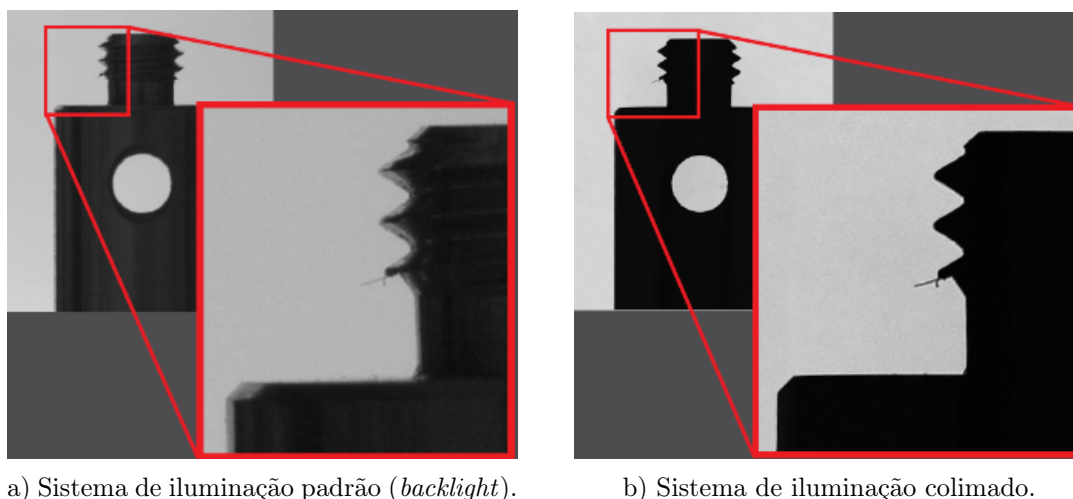


Figura 2.43: Comparação de duas amostras iluminadas por técnicas de iluminação diferentes [22].

possível observar um esquema do processo inicial de bioincrustação. Tanto as superfícies naturais como as artificiais são suscetíveis à colonização de micro-organismos, que formam uma fina camada, o que posteriormente leva à acumulação de outros organismos e seres vivos, como, por exemplo, plantas, algas e/ou animais. Este fenómeno ocorre em diversos ambientes aquáticos, e desenvolve-se de maneira semelhante em ambientes de água salgada e água doce.

Normalmente o efeito de bioincrustação pode ser reduzido através do uso de tinta anti-incrustante, que retarda o crescimento de organismos na superfície. Contudo, este problema pode também ser colmatado através do uso de outros métodos, como, por exemplo, a utilização de sistemas mecânicos de limpeza ou irradiação ultravioleta (UV). A tecnologia UV é tradicionalmente utilizada para esterilização de água em vários tipos de indústrias, como, por exemplo, farmacêutica e alimentícia. Este método é uma alternativa bastante eficaz na inibição do crescimento de organismos microscópicos, particularmente quando aplicada de forma contínua [74].

Alguns dos sistemas apresentados possuem mecanismos de prevenção da bioincrustação, como é o caso do SPC2 e o CPICS. No caso do SPC2, este utiliza um sistema mecânico que através da rotação de uma escova mantém o vidro ótico livre de incrustações.

No caso do CPICS, fontes emissoras de luz UV foram incorporadas no seu sistema de iluminação, de forma a que sejam irradiadas doses de luz ultravioleta, durante curtos períodos, de forma a prevenir a bioincrustação no vidro ótico do sistema. Na Figura 2.45 é possível observar o estado do SPC2 após três meses de missão, onde é possível verificar a eliminação de incrustações nos vidros óticos.

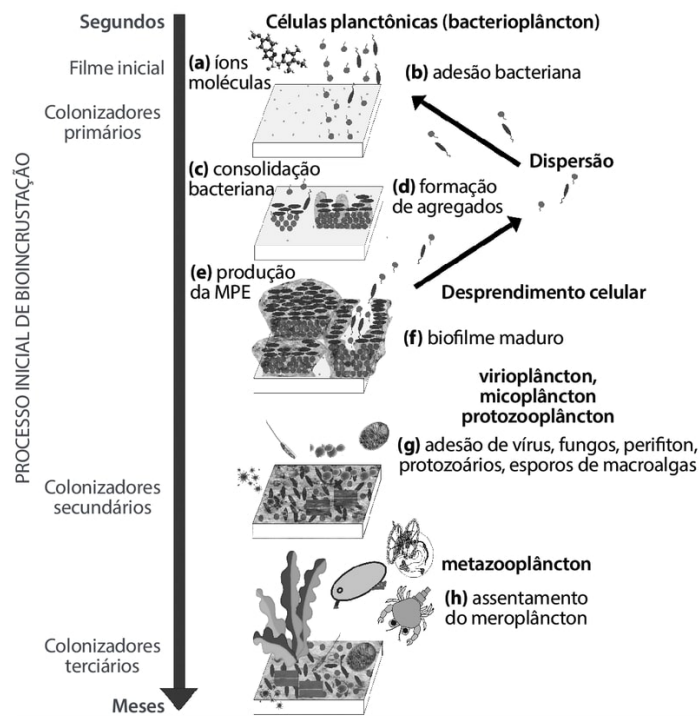


Figura 2.44: Processo inicial de bioincrustação, a partir da acumulação química e adesão bacteriana [73].



a) Estado do sistema após três meses submerso em ambiente aquático.

b) Instalação e alinhamento do mecanismo de escovas do SPC2.

Figura 2.45: Mecanismo de remoção de incrustações adotado pelo SPC2 [75].

Na Tabela 2.2 é possível observar um breve resumo dos sistemas de aquisição de imagens de plâncton descritos.

Tabela 2.2: Breve descrição das principais características dos sistemas de aquisição de imagens de plâncton.

Sistemas	VPRII	GUARD1	UVP5	ZOOVIS
Dimensões da amostra	100 μm a 1 cm	1 mm a 100 cm	100 μm a 10 cm	40 μm a 1 cm
Volume de imagem	0.9 L/s	Não apresentado	1.02 L/s	3.6 L/s
Tamanho do píxel	9 μm	4 μm	4.65 μm	10.8 μm
Câmara	1 MP	12.8 MP	1.3 MP	5 MP
Iluminação	<i>Xenon bulb</i>	LED	LED (625 nm, colimado)	LED (625 nm, colimado)
Software de classificação	Próprio [76, 77]	Próprio [42]	ZooScan [52]	Próprio [38]
Sistemas	ISIIS	SIPPER	CPICS	SPC2
Dimensões da amostra	1 mm a 13 cm	200 μm a 6 cm	40 μm a 12 mm	0.5 mm a 5 mm
Volume de imagem	70 L/s	10 L/s	3.3 mL/s a 0.35 L/s	0.2 mL/s
Tamanho do píxel	68 μm	134 μm e 67 μm	Não apresentado	7.4 μm
Câmara	Line Scan 2048 Pixeis	Line Scan 4096 Pixeis e 2048 Pixeis	6 MP	9 MP
Iluminação	LED (455 nm, colimado)	LASER (635 nm, colimado)	LED	LED
Software de classificação	Próprio [56]	Por implementar	Próprio [49]	Próprio [44]

Relativamente aos sistemas de aquisição de imagens holográficas de plâncton, como mencionado anteriormente, o uso de câmaras holográficas impunha bastantes limitações aos sistemas, como, por exemplo, no pós-processamento associado à revelação das imagens holográficas e no limite que estas fitas impõem na taxa de aquisição e no número de hologramas possíveis de captar. Tal como os sistemas tradicionais de captação de rede, estes sistemas também têm um custo operacional relativamente elevado. Assim, graças à conjugação de nova tecnologia para a aquisição holográfica, novos sistemas foram desenvolvidos com recurso à utilização de câmaras digitais.

Sendo esta ainda uma área pouco explorada, o principal objetivo dos novos sistemas holográficos não recaía principalmente na classificação dos organismos mas sim na captação e reconstrução de imagens em três dimensões, de forma a obter uma ideia mais completa do comportamento destes organismos no meio em que estes se encontram. Alguns destes sistemas permitem também a aquisição de vídeos holográficos, permitindo assim a aquisição de hologramas no espaço quadridimensional.

Na Tabela 2.3 é possível observar um breve resumo dos sistemas de aquisição de imagens holográficas de plâncton.

Tabela 2.3: Breve descrição das principais características dos sistemas de aquisição de imagens holográficas de plâncton.

Sistemas	eHoloCam	HoloSub	DIHM	SDHPI
Volume de imagem	0.92 L/s	0.61 L/s	12 mL/s	41 mL/s
Tamanho do píxel	3.5 μm	7.4 μm	7.4 μm	7.4 μm
Câmara	6.6 MP	4 MP	4.2 MP	1 MP
Iluminação	LASER (532 nm, colimado)	LASER (660 nm, colimado)	LASER (640 nm, colimado)	LASER (532 nm, colimado)

Em suma, pode observar-se na Figura 2.46 a taxonomia dos sistemas apresentados, em termos do seu método de aquisição, tipo de câmara e técnica de iluminação.

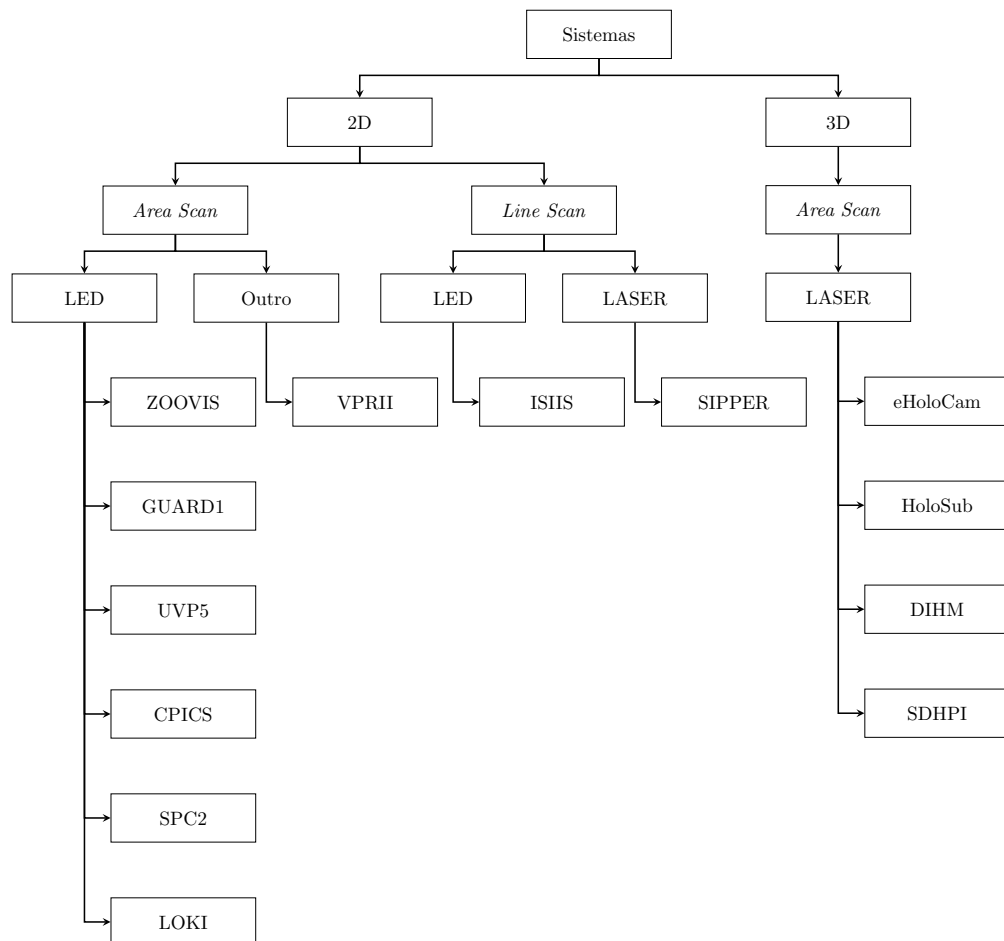


Figura 2.46: Taxonomia dos principais sistemas descritos.

**ESTA PÁGINA
FOI PROPOSITADAMENTE
DEIXADA EM BRANCO**

Capítulo 3

Projeto do Sistema Autónomo de Aquisição de Imagens de Alta Resolução de Plâncton

3.1 Introdução

Neste capítulo são descritas as várias etapas do dimensionamento do sistema autónomo de aquisição de imagens de alta resolução de plâncton. Este encontra-se dividido em três secções: em 3.2 são apresentados os modos de funcionamento do sistema e os requisitos de determinados componentes utilizados; em 3.3 é apresentada a arquitetura de alto nível do *hardware* e do *software* do sistema, e em 3.4 é realizado o dimensionamento do sistema, onde é apresentada uma análise dos vários componentes selecionados e o motivo da sua seleção.

3.2 Cenário de Operação

O sistema de captação de imagens de plâncton pode ser utilizado para, por exemplo, análise de ecossistemas, quantificação da biomassa (quantidade total de organismos existente num determinado ecossistema) e estudos ecológicos (biologia marinha) tais como caracterização de espécies existentes num dado ecossistema. Deste modo, a recolha de imagem pode ser efetuada em três modos:

- **Manual:** neste modo, o sistema aguarda por comandos do utilizador, como, por exemplo: comandos de *start* e *stop* da aquisição; alteração da sequência de disparo; visualização das imagens em tempo real; e outros. Normalmente, o sistema é conectado através de uma comunicação *ethernet*;
- **Integrado:** neste modo, o sistema pode ser ancorado ou integrado como um sensor em outros sistemas, como por exemplo, um AUV. O sistema não só será capaz de

comunicar com outros sistemas, como também comutar entre alimentação de baterias ou alimentação externa. Normalmente o sistema é operado através de comandos provenientes de um outro sistema, podendo partilhar as imagens ou armazená-las.

- **Autônomo:** neste modo, o sistema segue regras estabelecidas previamente à missão, sendo capaz de ficar inativo por um determinado período e ativar-se em diferentes intervalos específicos. Este é um modo autônomo com um *onboard data logger* e processamento de imagem em tempo real. Neste modo não existe qualquer tipo de ligação externa, sendo este utilizado para missões estacionárias e de longa duração.

Tendo em consideração os objetivos de aquisição de imagem de plâncton bem como a aplicação do sistema em múltiplos cenários, foram definidos os seguintes requisitos para os componentes do sistema.

- **Estrutura Mecânica:**

Uma vez que este sistema será utilizado em ambiente subaquático, o desenvolvimento de uma solução mecânica torna-se essencial. Assim, visto que a distribuição vertical da biomassa de plâncton diminui rapidamente abaixo de 100 m de profundidade [78], a solução mecânica terá que suportar uma pressão de pelo menos 10 bar, o que se reflete aproximadamente numa profundidade de 100 m.

- **Sistema de Iluminação:**

Tendo em consideração que o sistema será submerso a profundidades com reduzida luminosidade, será necessário utilizar um sistema de iluminação, de baixo consumo energético, composto por LEDs de alta potência. Este terá que ser capaz de controlar os LEDs a elevadas frequências de disparo, garantindo o sincronismo com a câmara.

- **Sistema Ótico:**

Considerando que o principal objetivo do sistema consiste na captação de imagens de plâncton e avaliando a Tabela 1.1, torna-se necessário o agrupamento das classes por dimensões de forma a facilitar o dimensionamento de um sistema ótico. Assim, cria-se um primeiro grupo com dimensões entre 2 μm a 200 μm (Nanoplâncton e Microplâncton), um segundo grupo com dimensões entre 200 μm a 200 mm (Mesoplâncton e Macrozooplâncton) e um terceiro grupo constituído apenas pelo Megaplâncton com dimensões superiores a 200 mm. Esta divisão de classes é fundamental, uma vez que é extremamente complexo dimensionar um sistema ótico capaz de abranger todas as classes.

- **Sistema de Gestão de Bateria:**

De forma a atingir uma elevada versatilidade na utilização do sistema, este terá que ser capaz de realizar tarefas autónomas e integrar-se em sistemas multirobóticos, como, por exemplo, o TURTLE [79]. Deste modo, será necessário o desenvolvimento

de uma unidade de gestão de baterias que seja capaz de, por exemplo, no caso de o sistema operar em modo autónomo, monitorizar e utilizar a energia proveniente de um conjunto de baterias de forma a alimentar todo o sistema. No caso de o sistema operar em conjunto com outros sistemas, este terá que ser capaz de utilizar, se possível, energia exterior para aumentar o período de utilização do sistema e o tempo de vida das baterias.

- **Capacidade Computacional:**

Uma vez que é necessário realizar aquisição de imagens, e de seguida armazená-las e ou processá-las torna-se essencial a utilização de uma unidade de processamento capaz de executar estas tarefas simultaneamente, se necessário. Idealmente, esta unidade computacional deverá incorporar componentes adicionais para o processamento de algoritmos de inteligência artificial.

De forma a desenvolver um sistema versátil, pretende-se que este seja compatível com diferentes cenários de aplicação:

- **Veículos subaquáticos:**

Os veículos subaquáticos são veículos submersíveis utilizados na exploração oceanográfica. Estes podem ser veículos submarinos autónomos (AUVs).

O TURTLE [79], ilustrado na Figura 3.1, desenvolvido pelo INESC TEC, é um *lander* robótico híbrido que combina as capacidades de locomoção e autonomia de AUVs com a possibilidade de permanecer no fundo do oceano durante longos períodos, permitindo a realização de análises em diversas zonas do ecossistema.

Neste tipo de configuração, o período da missão depende essencialmente do veículo e da sua autonomia, sendo normalmente a duração da mesma bastante reduzida quando comparada, por exemplo, com a amarração oceanográfica. Uma vez que estes veículos encontram-se equipados com uma unidade de processamento e armazenamento de dados, estes são capazes de alimentar, comunicar e controlar sistemas integrados a este, sendo os parâmetros, analisados pelo sistema integrado, armazenados e extraídos no fim de cada missão.

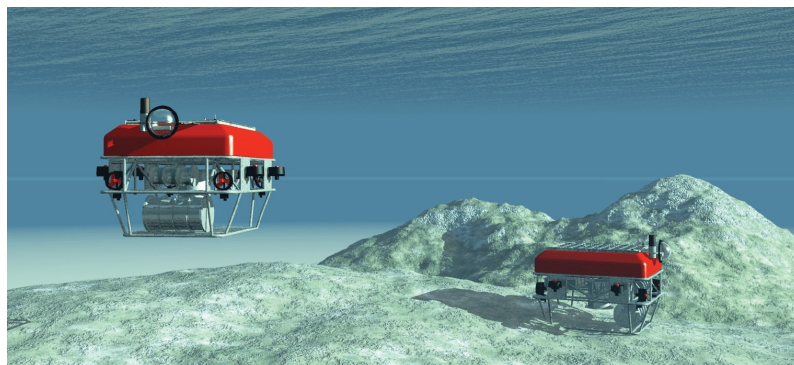


Figura 3.1: Cenário de aplicação do TURTLE [79].

– **Amarração oceanográfica:**

Uma amarração oceanográfica, ilustrada na Figura 3.2, consiste essencialmente numa plataforma de medição composta por um fio de aço onde diversos sensores autônomos são dispostos ao longo de várias profundidades juntamente com bóias de forma a fornecer flutuabilidade e estabilidade suficiente para manter a amarração o mais vertical possível [80].

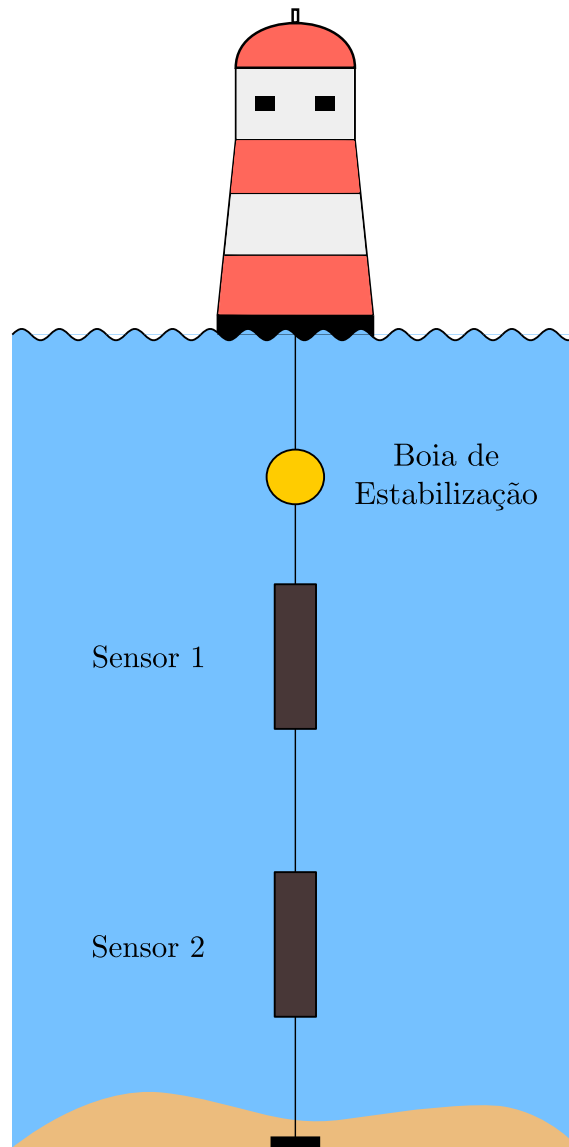


Figura 3.2: Ilustração de uma amarração oceanográfica [81].

Normalmente estas plataformas possuem uma bóia de sinalização à superfície que não só fornece alimentação aos diversos sensores como também permite a transferência de informação através de diversos métodos de comunicação, como, por exemplo, *Global System for Mobile Communications* (GSM).

Esta configuração possibilita ao sistema realizar missões a longo prazo, partilhando informação em tempo real relativamente a parâmetros do ecossistema em questão e classificação dos organismos presentes no mesmo. Contudo, uma vez que a amarração se encontra fixa, as análises são realizadas no mesmo local, o que impede a caracterização de outras zonas do mesmo ecossistema.

– **Integrado com sistema de monitorização marinha:**

Os sistemas de monitorização marinha são sistemas autónomos utilizados para a análise química, física e biológica de um ecossistema.

O MarinEye, ilustrado na Figura 3.3, como mencionado no Capítulo 1, é um sistema autónomo constituído por diversos sensores que fornecem informações relevantes para a avaliação de ecossistemas marinhos.



Figura 3.3: Fotografia do MarinEye em missão.

Esta configuração é bastante similar à da amarração oceanográfica uma vez que existe partilha de informação em tempo real de parâmetros provenientes dos sensores presentes no sistema de monitorização marinha. Ao contrário da amarração oceanográfica, esta configuração não é fixa, podendo ser submergida em diferentes localizações. O período da missão depende essencialmente da autonomia das baterias ou das baterias do sistema de monitorização.

3.3 Arquitetura do Sistema

3.3.1 Arquitetura do *Hardware*

Relativamente à arquitetura de *hardware* do sistema, este é composto por uma câmara acoplada a uma lente ótica, estando esta orientada diretamente para o sistema de iluminação, de forma a que seja implementada uma iluminação do tipo *bright field, back lighting* apresentada em 2.1.5.

De modo a atingir altas taxas de aquisição, é utilizado um sistema de iluminação que controla os LEDs de alta potência em sincronismo com a câmara. Para o controlo de todos os componentes, é necessário a utilização de uma unidade computacional SBC (do inglês *Single Board Computer*).

O sistema incorpora também um BMS (do inglês *battery management system*) que monitoriza e envia a informação das baterias do sistema à SBC.

De modo a estabelecer uma comunicação externa à SBC, o sistema possui uma ligação *ethernet*, que permite aceder a todos os dados obtidos e realizar alterações ao sistema em tempo real.

Na Figura 3.4 encontra-se representada a arquitetura de alto nível do *hardware* do sistema.

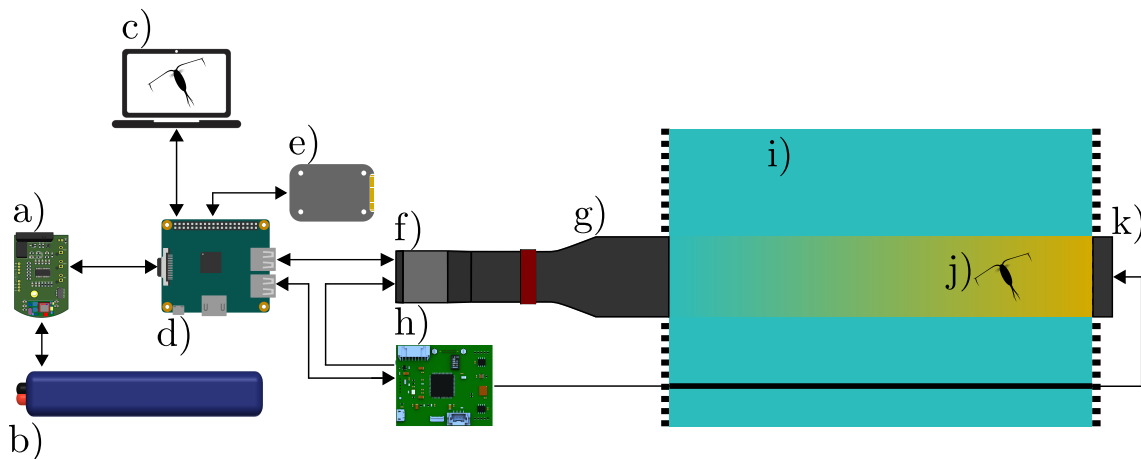


Figura 3.4: Arquitetura de alto nível do *hardware* do sistema.

- | | |
|---------------------|-------------------------------|
| a) BMS; | g) Lente ótica; |
| b) Bateria; | h) Sistema de iluminação; |
| c) Ligação externa; | i) Coluna de água; |
| d) SBC; | j) Organismo em visualização; |
| e) Armazenamento; | k) LEDs. |
| f) Câmara; | |

3.3.2 Arquitetura do *Software*

No que diz respeito à arquitetura de *software*, para o desenvolvimento de um sistema versátil, é utilizado o ROS¹ (do inglês *Robot Operating System*) para o controlo da SBC. O ROS é um *meta operating system* que fornece uma camada de comunicação estruturada subjacente ao sistema operativo existente [82]. Este *middleware* de robótica é composto por diversas estruturas de *software* denominadas de *packages*, que se baseia em implementações de código *open-source* de algoritmos e *drivers* normalmente utilizados em robótica. Desta forma, a utilização deste *middleware* facilitará a integração deste sistema com outros sistemas, nomeadamente sistemas desenvolvidos no LSA.

É também utilizado um sistema operativo em tempo real, denominado, FreeRTOS², para o controlo do BMS. O FreeRTOS é um RTOS (do inglês *Real Time Operating System*) projetado para ser executado num microcontrolador, proporcionando funcionalidades como *real time scheduling* e comunicação entre tarefas.

Desta forma, o *software* é composto por três principais *drivers* em ROS: o Câmara ROS Driver para o controlo e aquisição de imagens provenientes da câmara, sendo estas publicadas num tópico e armazenadas na unidade de processamento; o Light ROS Driver para o controlo do sistema de iluminação, que recebe comandos do utilizador, interpretando-os e traduzindo-os em comandos compatíveis com o sistema de iluminação; e por fim, o BMS ROS Driver para o controlo do sistema de monitorização das baterias, que recebe comandos do utilizador, interpretando-os e traduzindo-os em comandos compatíveis com o sistema de baterias, sendo os dados de monitorização publicados num tópico.

Na Figura 3.5 encontra-se representada a arquitetura de alto nível do *software* do sistema.

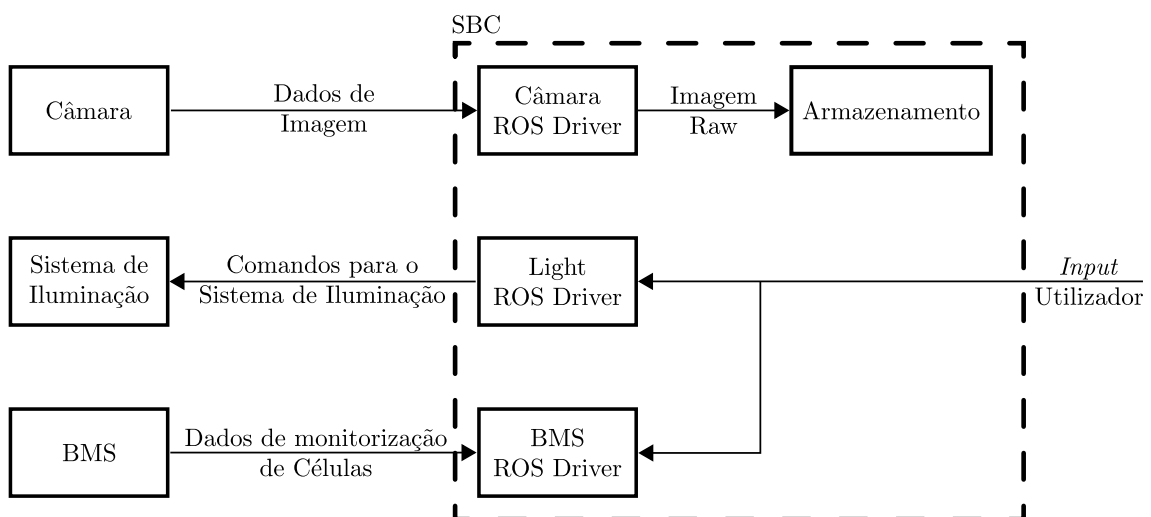


Figura 3.5: Arquitetura de alto nível do *software* do sistema.

¹<https://www.ros.org/>

²<https://www.freertos.org/>

A introdução de algoritmos de processamento e classificação de imagem prévios ao armazenamento, introduziriam melhorias significativas numa solução final do projeto, como, por exemplo, reduzir a quantidade de memória utilizada para o armazenamento das imagens, o que seria especialmente importante em missões de longa duração. Contudo, apesar de o processamento de imagem e a classificação de organismos não se encontrarem dentro do âmbito desta dissertação, é apresentado, na Figura 3.6, um conceito de arquitetura do *software* de processamento e classificação de plâncton.

Deste modo, após a receção de uma imagem, esta seria analisada de forma a verificar a presença de objetos na mesma, evento a). Na ausência de objetos na imagem, esta seria eliminada, evento b), resumindo o processo de aquisição, evento g). No caso de objetos serem identificados, seriam aplicados melhoramentos na mesma, de forma a remover ruído, evento c). Melhorada a imagem, esta seria enviada para algoritmos de classificação, evento d), e armazenada juntamente com o respetivo resultado na unidade de armazenamento, evento e), repetindo-se novamente todo o processo, evento f).

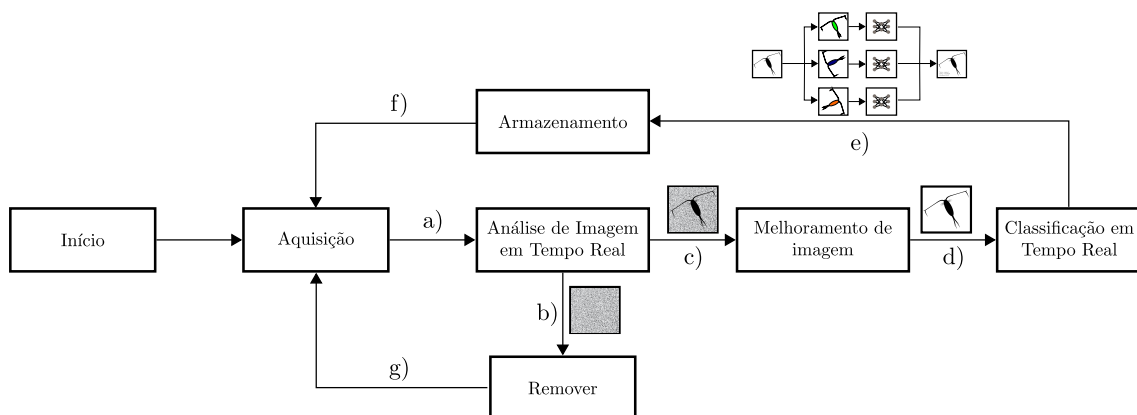


Figura 3.6: Conceito de arquitetura do *software* de processamento e classificação.

3.4 Dimensionamento

3.4.1 Câmaras

Uma vez que a captação de imagens de organismos de reduzidas dimensões requer a utilização de uma câmara de alta resolução, procedeu-se à realização de um estudo de mercado, considerando os vários parâmetros para a seleção da mesma.

Tabela 3.1: Descrição dos parâmetros das câmaras recolhidas.

	UI-3590CP Rev.2 [83]	U3-3800CP Rev.2 [84]	BFS-U3-123S6C-C [85]	BFS-U3-200S6C-C [86]
Megapíxeis	18.10 Mpíxeis	20.44 Mpíxeis	12.29 Mpíxeis	19.96 Mpíxeis
Resolução (h × v)	4912 × 3684 píxeis	5536 × 3692 píxeis	4096 × 3000 píxeis	5472 × 3648 píxeis
Aspect Ratio	4:3	3:2	11:8	3:2
Sensor	CMOS	CMOS	CMOS	CMOS
Tamanho do Sensor	1/2.3 in	1 in	1.1 in	1 in
Tamanho do Píxel	1.25 μm	2.40 μm	3.45 μm	2.40 μm
Obturador	Rolling Shutter	Rolling Shutter	Global Shutter	Rolling Shutter
Velocidade do Obturador	0.013 ms – 998 ms	0.053 ms – 814 ms	10 μs – 30 s	67 μs – 30 s
Frame Rate	21.0 fps	10 fps	30 fps	18 fps
Montagem	C-Mount	C-Mount	C-Mount	C-Mount
Interface	USB 3.0	USB 3.0	USB 3.1	USB 3.1
Consumo Máximo	3.3 W	3 W	3 W	3 W
Custo	828.00 €	1050.00 €	2895.00 €	759.00 €

De modo a seleccionar a câmara que mais se adequa ao sistema, foi realizada uma análise de acordo com a informação da Tabela 3.1. Assim, foram realizados cálculos teóricos de forma a simular o comportamento ótico do sensor com e sem a presença de uma lente ótica.

A Equação 3.1 permite obter o campo de visão horizontal, HFoV [mm], através do quociente entre o tamanho horizontal do sensor, Horizontal Sensor Size [mm], e o PMAG. Por sua vez, através do quociente entre o campo de visão horizontal e o Aspect Ratio, pode obter-se o campo de visão vertical, VFoV [mm], através da Equação 3.2 [22].

$$\text{HFoV} = \frac{\text{Horizontal Sensor Size}}{\text{PMAG}} \quad (3.1)$$

$$\text{VFoV} = \frac{\text{HFoV}}{\text{Aspect Ratio}} \quad (3.2)$$

A Equação 3.3 permite obter o Tamanho do Píxel [μm], através do quociente entre o campo de visão horizontal, HFoV [mm], e Resolução Horizontal [píxeis] [22].

$$\text{Tamanho do Píxel} = \frac{\text{HFoV}}{\text{Resolução Horizontal}} \quad (3.3)$$

A Equação 3.4 permite obter a densidade de píxel, PPmm [píxeis/mm], através do quociente entre o tamanho diagonal do sensor em píxeis, Diagonal Sensor Size [píxeis], e o tamanho diagonal do sensor em milímetros, Diagonal Sensor Size [mm] [22].

$$\text{PPmm} = \frac{\text{Diagonal Sensor Size}}{\text{Diagonal Sensor Size}} \quad (3.4)$$

Na Figura 3.7 está representada a resolução, os campo de visão horizontal e vertical (HFoV e VFoV), o tamanho do píxel e a densidade de píxel, para cada uma das câmaras com e sem a utilização de uma lente ótica.

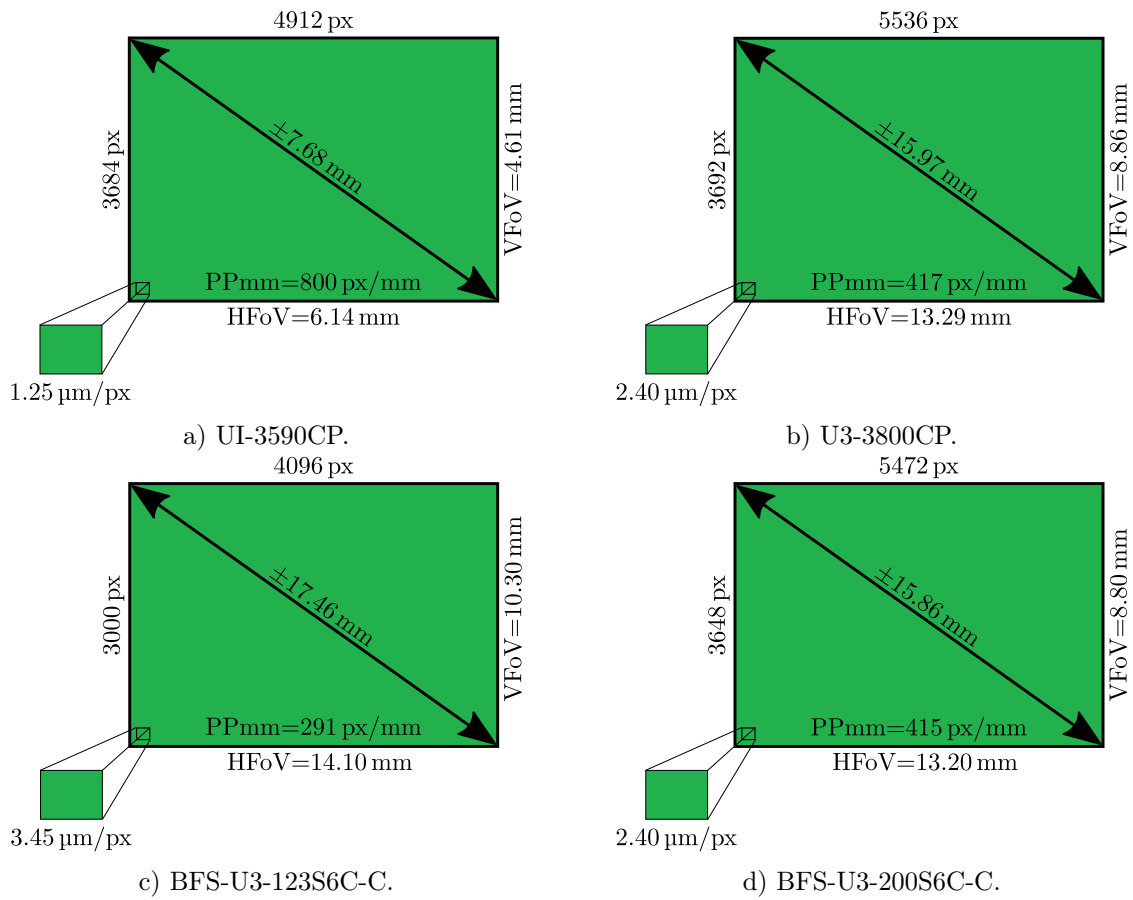


Figura 3.7: Descrição do sensor com e sem lente ótica.

De forma a findar a decisão da câmara a utilizar, foi realizada uma simulação teórica de uma captura de imagem com cada uma das câmaras, tendo sido utilizada uma amostra de um Copépode, ilustrado na Figura 3.8.

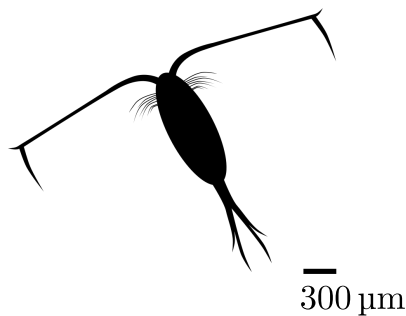


Figura 3.8: Amostra do Copépode utilizado.

Na Figura 3.9 é possível observar a simulação da captura da amostra por cada uma das câmaras.

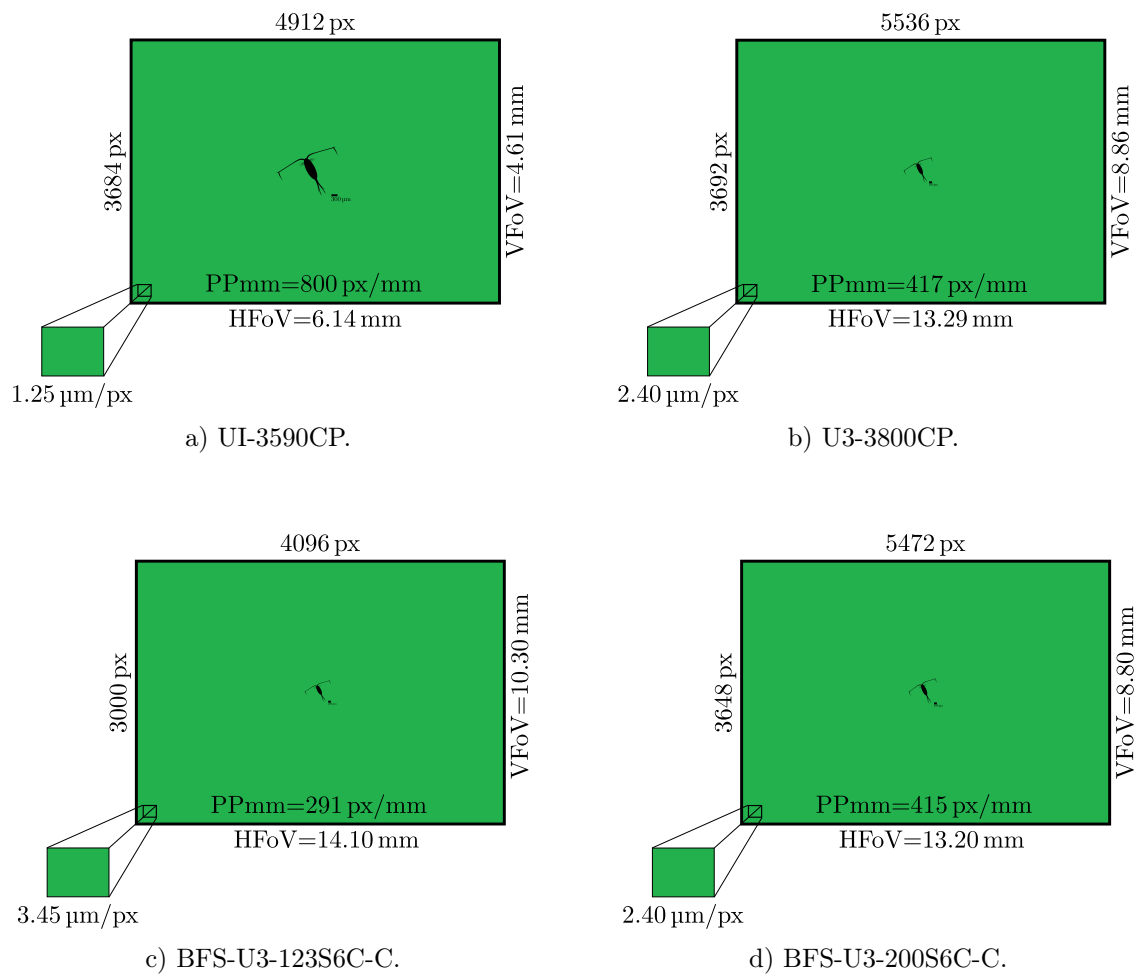


Figura 3.9: Simulação teórica da captura do Copépode por cada uma das câmaras.

Uma vez que a resolução é representada pela quantidade de detalhes que uma câmara é capaz de capturar, esta é dependente do tamanho do píxel, FoV, densidade de píxel, entre outros parâmetros. Assim, através da análise realizada, é possível verificar que a câmara que mais se enquadra à aplicação é a UI-3590CP. Esta não só apresenta uma relação entre a resolução e o FoV bastante adequada, como também é a única que possui um tamanho de píxel reduzido, sofrendo pouca variação no seu tamanho quando utilizada a lente ótica. Relativamente à densidade de píxeis, esta possui o valor mais elevado de píxeis por milímetro, o que resulta em imagens mais nítidas.

3.4.2 Lentes

De forma a que seja possível projetar a imagem destes organismos no sensor da câmara, é necessária a utilização de uma lente ótica. Para tal, vários parâmetros foram considerados para a seleção da mesma, tendo sido reunidas algumas lentes com diferentes características.

Tabela 3.2: Descrição dos parâmetros das lentes recolhidas.

	TitanTL™ 0.151×[87]	SilverTL™ 0.16×[88]	TitanTL™ 0.184×[89]	DTCM230-36 0.317×[90]	VariMagTL™ 0.25× – 0.50×[91]
Tipo de Lente	Telecêntrica	Telecêntrica	Telecêntrica	Bi-Telecêntrica	Telecêntrica
Ampliação	0.151 x	0.16 x	0.184 x	0.317 x	0.25 x – 0.5 x
Tamanho do Sensor	1/1.8 in	1/2 in	2/3 in	2/3 in	2/3 in
Distância de Trabalho	111 mm	177 mm	110 mm	110 mm	110.1 mm – 145 mm
Profundidade de Campo	17.1 mm	19.74 mm	11.5 mm	4.3 mm	variável
Montagem	C-Mount	C-Mount	C-Mount	C-Mount	C-Mount
Custo	1495.00 €	1015.00 €	1495.00 €	884.00 €	2295.00 €

De modo a escolher a lente que mais se adequa à aplicação do sistema, foi realizada uma análise de acordo com a informação da Tabela 3.2. Assim, foram realizados cálculos teóricos, utilizando as equações do subcapítulo 3.4.1, de forma a prever o comportamento ótico da câmara UI-3590CP com as diversas lentes de diferentes ampliações. No Apêndice A, é possível observar o comportamento ótico das restantes câmaras com as diversas lentes de diferentes ampliações.

Analisando a Figura 3.10 é possível verificar que os reduzidos valores de PMAG refletem-se em elevados valores de FoV, isto é, quanto menor for a ampliação, maior é a área do campo de visão. Como se pode verificar na Equação 3.3, o tamanho do píxel e o FoV são diretamente proporcionais. Uma vez que se pretende captar imagens de organismos de dimensões reduzidas, é necessário possuir uma relação equilibrada de parâmetros, ou seja, é necessário possuir uma área do campo de visão o mais elevada possível, mantendo, no entanto, o tamanho do píxel o mais reduzido possível.

Assim, chegou-se à conclusão que as lentes DTCM230-36 0.317× e VariMagTL™ 0.25× – 0.50× são as que apresentam uma relação mais equilibrada de parâmetros para este sistema. Desta forma, optou-se por escolher a lente DTCM230-36 0.317×, uma vez que, esta possuiu uma relação custo-qualidade mais adequada.

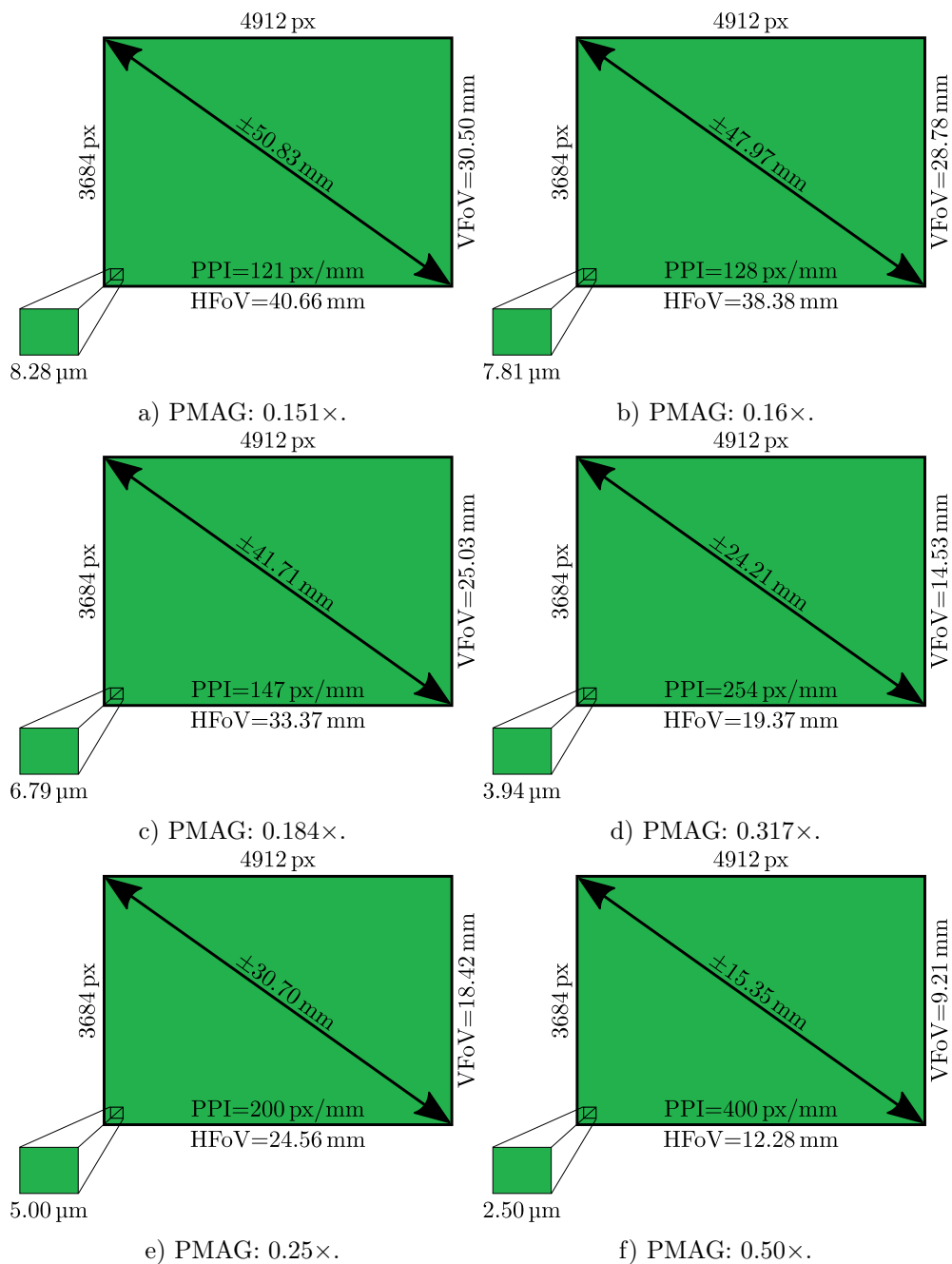


Figura 3.10: Comportamento óptico da câmara UI-3590CP com lentes de diferente PMAG.

Escolhida uma solução ótica, foi realizada uma simulação teórica de uma captura de imagem com a câmara e lente escolhida, tendo sido utilizada a amostra do Copépode, ilustrado na Figura 3.8.

Na Figura 3.9 é possível observar a simulação da captura da amostra.

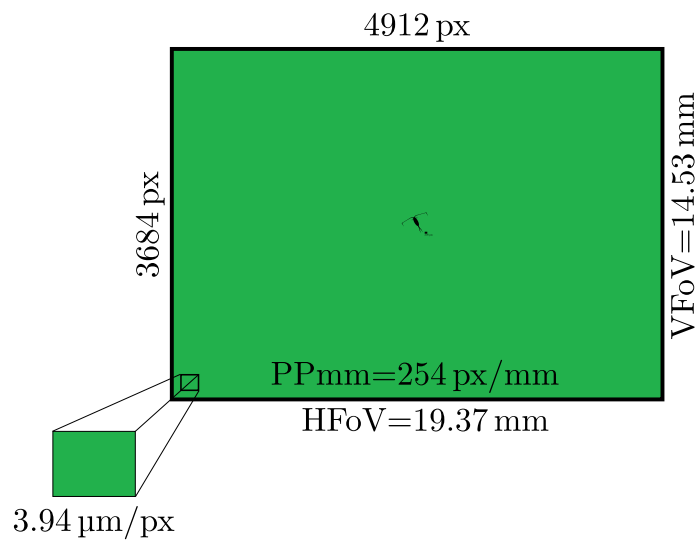


Figura 3.11: Simulação teórica da captura do Copépode do *setup* escolhido.

3.4.3 Iluminação

Relativamente ao sistema de iluminação, é utilizado um controlador de iluminação LED desenvolvido e adotado em projetos no LSA. Este controlador, denominado SLS (do inglês *structured light system*), representado na Figura 3.12, é utilizado neste sistema não só para a geração de sequências para o controlo dos LEDs, como também para o disparo da câmara. O SLS é controlado pela unidade de processamento através do protocolo de comunicação RS-485, permitindo ao utilizador a escolha de diferentes sequências.

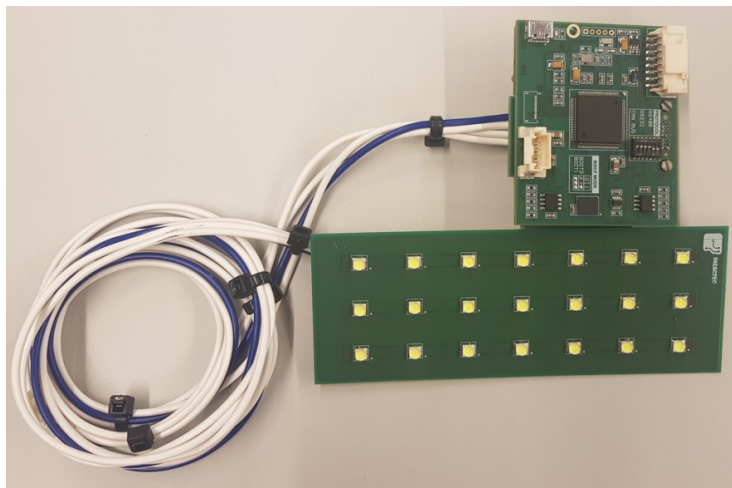


Figura 3.12: Ilustração de um *setup* do SLS utilizado no LSA.

3.4.4 SBCs

Uma vez que é necessário controlar a câmara, o sistema de iluminação, armazenar a informação, entre outras diversas tarefas, consideraram-se diferentes SBCs. Na Tabela 3.3

estão reunidas as SBCs que mais se adequam aos requisitos deste sistema e na Figura 3.13 encontra-se uma ilustração das mesmas.

Tabela 3.3: Descrição dos parâmetros das SBCs reunidas.

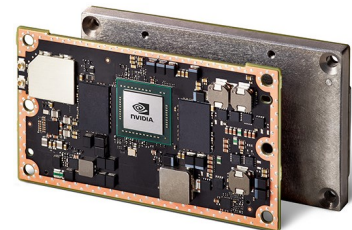
	Odroid XU4 [92]	UP Core [93]	Jetson TX2 [94]
CPU	ARM Cortex-A15 Quad 2 GHz Cortex-A7 Quad 1.3 GHz	Intel Atom X5-Z8350 1.92 GHz	Dual-Core NVIDIA Denver 2 64-Bit CPU 2 GHz Quad-Core ARM Cortex-A57 2 GHz MPCore
GPU	Mali-T628 MP6	Intel HD 400 Graphics	256-core NVIDIA Pascal GPU
RAM	2 GB LPDDR3	1 GB / 2 GB / 4 GB LPDDR4	8 GB LPDDR4
Interfaces	2x USB 3.0 1x USB 2.0 1x Ethernet 10/100/1000 MB/s	2x USB 2.0 (Pin Header) 1x USB 3.0 WiFi 802.11 + Bluetooth 4.0 1x Ethernet 10/100/1000 MB/s	USB 2.0 USB 3.0 WiFi 802.11 + Bluetooth 4.0 Ethernet 10/100/1000 MB/s
Consumo Máximo	15 W	13 W	15 W
Dimensões	83 mm × 58 mm	56.50 mm × 66 mm	50 mm × 87 mm
Custo	44 €	90 € – 150 €	415 €



a) Odroid XU4.



b) UP Core.



c) Jetson TX2.

Figura 3.13: Ilustração das SBCs reunidas.

Uma vez que a NVIDIA Jetson TX1, TX2 e TX2i são desenvolvidas em módulos compactos, é necessária a utilização do Nvidia Developer Kit ou de uma *carrier board* de forma a ter acesso a várias interfaces, como, por exemplo, USB, Ethernet, HDMI, SATA, entre outras. Ao contrário das *carrier boards*, o Developer Kit é desenvolvido pela NVIDIA, [95], e permite ao utilizador ter acesso a todas as interfaces disponíveis do módulo, o que faz com que este apresente dimensões bastante elevadas. No caso das *carrier boards*, estas apresentam dimensões idênticas ao módulo. Dependendo da *carrier board* escolhida, esta pode ter menos interfaces. Contudo, é permitido ao utilizador agregar diversas *boards* de modo a escolher, de uma forma modular, as interfaces mais convenientes. Na Figura 3.14 é possível observar o kit de desenvolvimento e um exemplo de uma das várias *carrier boards* existentes no mercado.



Figura 3.14: Placas de acesso às interfaces do módulo da NVIDIA: à esquerda Nvidia Developer Kit [95] e à direita Astro Carrier [96].

De forma a determinar a aptidão das SBCs escolhidas, foram realizados testes à taxa de aquisição da câmara de modo a avaliar a discrepância entre as diversas SBCs. De modo a que os testes às três SBCs sejam realizados nas mesmas condições, é utilizado o mesmo *setup* para avaliar cada uma, nomeadamente a mesma versão de Linux (Ubuntu 16.04), a mesma distribuição de ROS (Kinetic Kame) e o mesmo *driver open source* da câmara escolhida (*ueye_cam*) [97].

A resolução da imagem utilizada ao longo do teste foi de 4912×3684 pixels, equivalente a 18 MP, obtendo os resultados presentes na Tabela 3.4.

Tabela 3.4: Resultados da frequência de aquisição que cada SBC suporta.

SBC	ODROID	Up Core	Jetson TX2
FPS	7	12	21

Considerando que este projeto se encontra numa fase inicial, optou-se por utilizar a Odroid XU4, uma vez que, esta apresenta uma relação custo-desempenho mais adequada.

3.4.5 Consumo Energético

De acordo com o que foi mencionado no Capítulo 3.2, é incorporado um BMS para a gestão das baterias, controlo do sistema e comutação entre utilização de energia externa ou das baterias, permitindo assim a utilização do sistema nos diversos cenários de aplicação apresentados. Desta forma, utilizou-se os dados de consumo máximo dos componentes que mais consomem, especificamente a câmara, o sistema de iluminação e a SBC, que consomem respetivamente 3.3 W, 12 W e 15 W. Foram descartadas perdas de outros equipamentos e assumiu-se que o consumo total do sistema não ultrapassaria os 36 W.

São utilizadas duas baterias de polímero de lítio (LiPo) em série, ambas constituídas por três células em série, cada com uma tensão de 3.7 V, originando uma tensão total de 22.2 V e uma capacidade de 5800 mAh, o que permite ao sistema um funcionamento

constante com todos os componentes em consumo máximo de aproximadamente 3h. A escolha destas baterias é um compromisso entre dimensão, custo e tempo de operação.

3.4.6 Estrutura Mecânica

Relativamente à estrutura mecânica, após análise da Figura 3.4, optou-se por seguir o conceito ilustrado na Figura 3.15. Assim, decidiu-se separar o sistema em dois encapsulamentos, a secção 1 composta pela câmara, lente ótica, unidade de armazenamento, SBC e BMS e a secção 2 composta pelos LEDs de alta potência e o SLS.

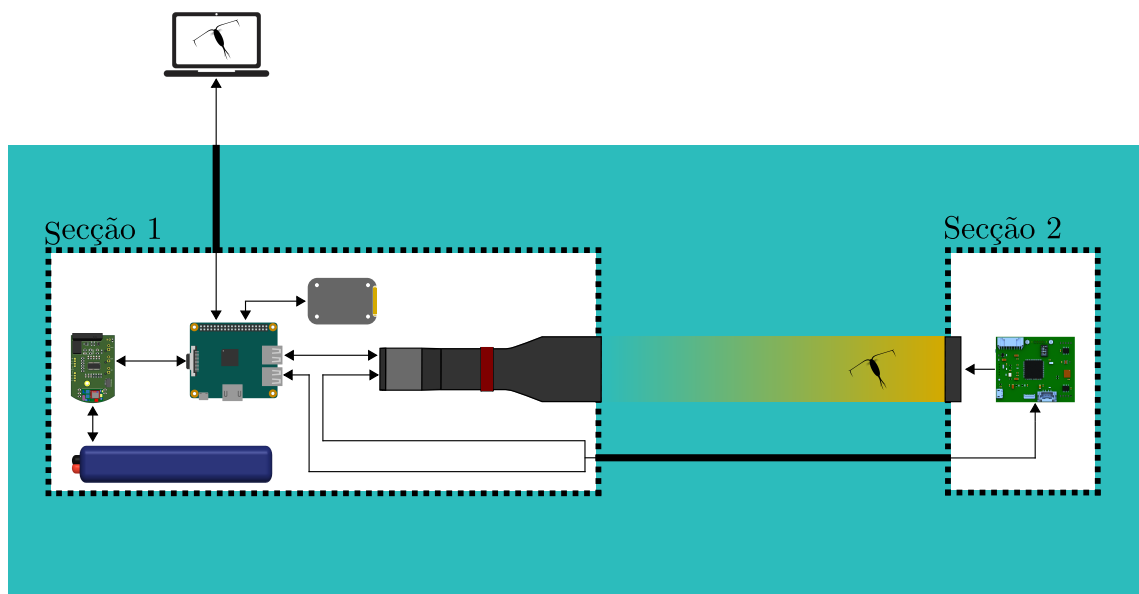


Figura 3.15: Esquema conceitual da estrutura mecânica.

De acordo com os requisitos estabelecidos relativos à estrutura mecânica (especificamente suportar pressões de pelo menos 10 bar), esta adota uma forma cilíndrica, uma vez que a pressão é distribuída de uma forma mais homogênea [98].

O material utilizado para a estrutura mecânica é o alumínio 6063-T6 visto que este fornece uma boa capacidade de extrusão e uma superfície de alta qualidade adequada para anodização³, tornando assim o material resistente à corrosão [100].

De forma a dimensionar a estrutura, utilizou-se o *software* Under PressureTM Design [101] que realiza uma simulação tendo em consideração o material e uma geometria simplificada da estrutura mecânica. Assim, para dar início à simulação, especificaram-se inicialmente as propriedades do material a utilizar, mais propriamente do alumínio 6063-T6, descritas na Tabela 3.5.

³A anodização é um processo eletroquímico utilizado em metais como o alumínio para aumentar a sua resistência à corrosão e desgaste. O processo mais económico é a anodização sulfúrica que é realizado através da imersão do material em um banho de ácido sulfúrico e aplicação de uma corrente elétrica contínua [99].

Tabela 3.5: Propriedades do alumínio 6063-T6 [102].

<i>Yield Strength</i>	214 MPa
<i>Young's Modulus</i>	68.9 GPa
<i>Density</i>	2.7 g/cm ³
<i>Poisson's Ratio</i>	0.33

De seguida, especificaram-se as dimensões do cilindro, considerando os componentes utilizados, podendo estas serem alteradas ao longo da implementação, tendo sempre o cuidado de realizar novamente a simulação.

Tabela 3.6: Dimensionamento do cilindro.

Diâmetro Interno	90 mm
Diâmetro Externo	100 mm
Espessura	5 mm
Comprimento	500 mm

A simulação demonstra que o cilindro dimensionado sofre uma deformação permanente, levando à falha de estanqueidade, a uma pressão de 234.75 bar, que se reflete aproximadamente numa profundidade de 2325.3 m. É de salientar que esta simulação é em condições ideais, pelo que os resultados poderão sofrer variações em cenários reais. No Apêndice B é apresentado o relatório da simulação.

Capítulo 4

Implementação e Resultados

4.1 Introdução

Neste capítulo é apresentada a implementação e os resultados obtidos pelo sistema. Este encontra-se dividido em cinco secções: em 4.2 é apresentada a implementação da estrutura mecânica, onde são apresentadas as várias estruturas que compõem o sistema e as simulações do modelo mecânico final para diferentes pressões; em 4.3 é apresentado o *hardware* desenvolvido para o BMS e a placa de iluminação; em 4.4 é apresentado o *software* desenvolvido para o BMS e para a SBC; em 4.5 são apresentados os resultados experimentais obtidos em laboratório e em cenário real; por fim, em 4.6 são apresentadas as melhorias realizadas após a análise dos resultados.

4.2 Estrutura Mecânica

Considerando os requisitos deste projeto, foi elaborada uma estrutura mecânica para o encapsulamento do *hardware* selecionado através do uso de *software* CAD (do inglês *Computer-aided Design*), em particular o *software* SolidWorks. Esta estrutura é dividida em duas partes, sendo elas a estrutura interna, composta por um conjunto de anéis separados através de espaçadores e a estrutura externa, de forma cilíndrica capaz de encapsular a estrutura interna e de permitir o funcionamento do sistema quando submerso.

4.2.1 Estrutura Interna

Na Figura 4.1 é possível observar todas as peças desenvolvidas para cada componente utilizado. Estas agrupam todos os componentes de uma forma robusta e simples. No Apêndice C é apresentado o desenho de cada peça com as medidas mais relevantes.

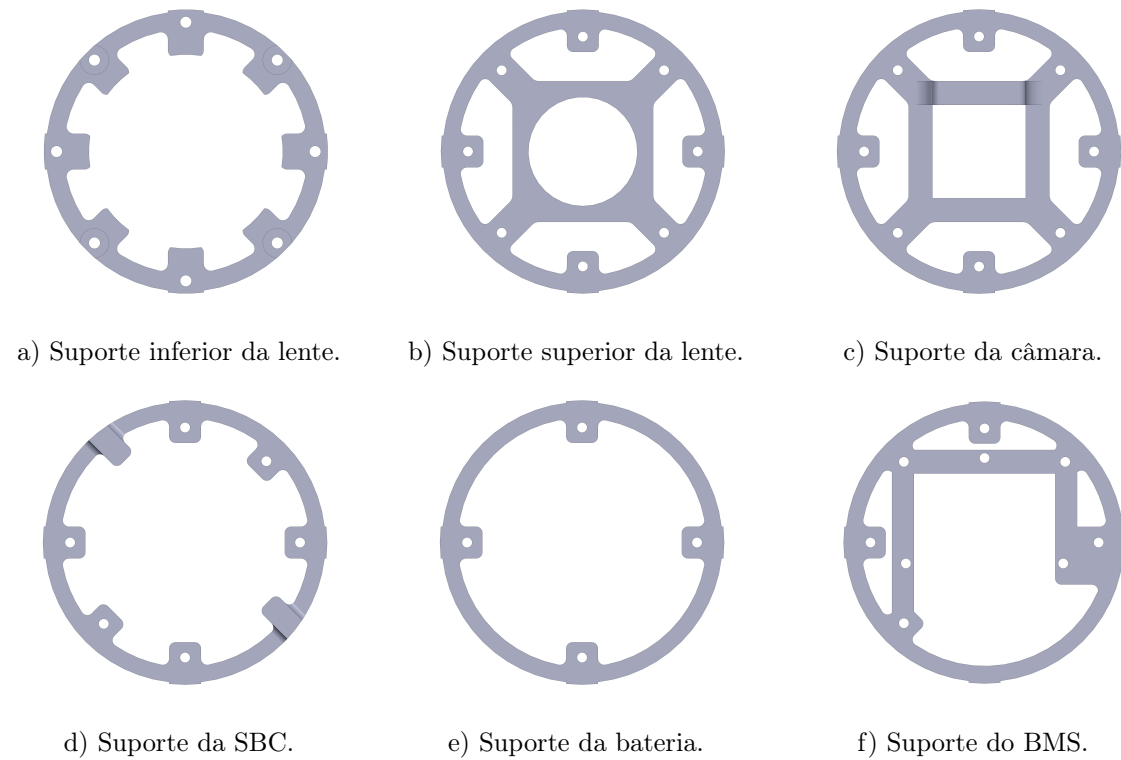


Figura 4.1: Peças do suporte interno.

A estrutura é dividida em duas partes: uma que engloba a lente, a câmara e a SBC, e outra que engloba as baterias e a placa de potência. Estas são unidas através do uso de espaçadores, criando uma única estrutura.

Na Figura 4.2 é possível observar uma ilustração 3D da montagem final do suporte desenvolvido.

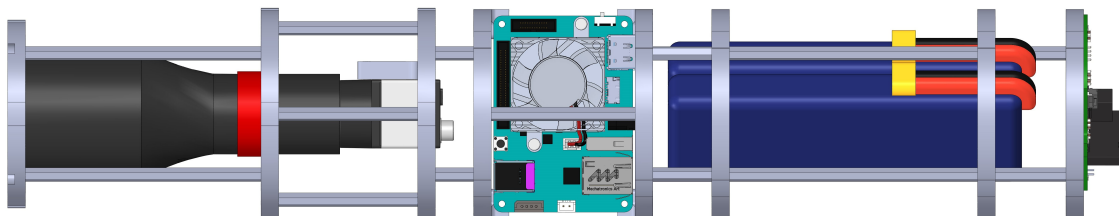
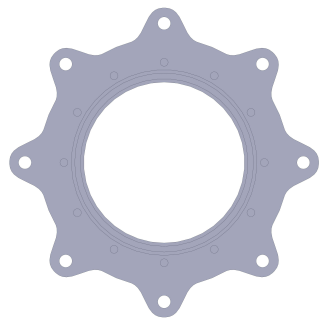


Figura 4.2: Ilustração 3D da estrutura interna.

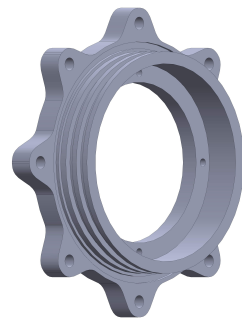
4.2.2 Estrutura Externa

Relativamente à estrutura externa, esta é dividida em duas secções: a secção 1 composta pelo *hardware* ótico, SBC, baterias e BMS e a secção 2 composta pelo SLS e placa de iluminação.

Na Figura 4.3 é possível observar as peças desenvolvidas para a secção 1 da estrutura externa. No Apêndice C é apresentado o desenho de cada peça com as medidas mais relevantes.



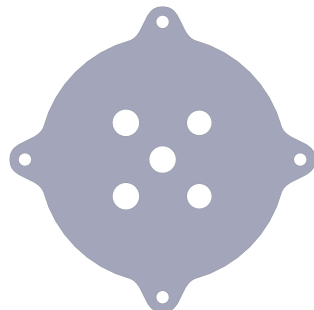
a) Tampa frontal do cilindro.



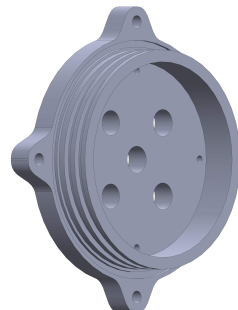
b) Ilustração 3D da tampa frontal do cilindro.



c) Ilustração 3D do cilindro.



d) Tampa traseira do cilindro.



e) Ilustração 3D da tampa traseira do cilindro.

Figura 4.3: Peças desenvolvidas para a secção 1 da estrutura externa.

O diâmetro e comprimento do cilindro (ilustrado na Figura 4.3 c)) são projetados em função da estrutura interna desenvolvida. Relativamente às tampas, estas possuem uma abertura para a utilização do sistema ótico e do sistema de iluminação.

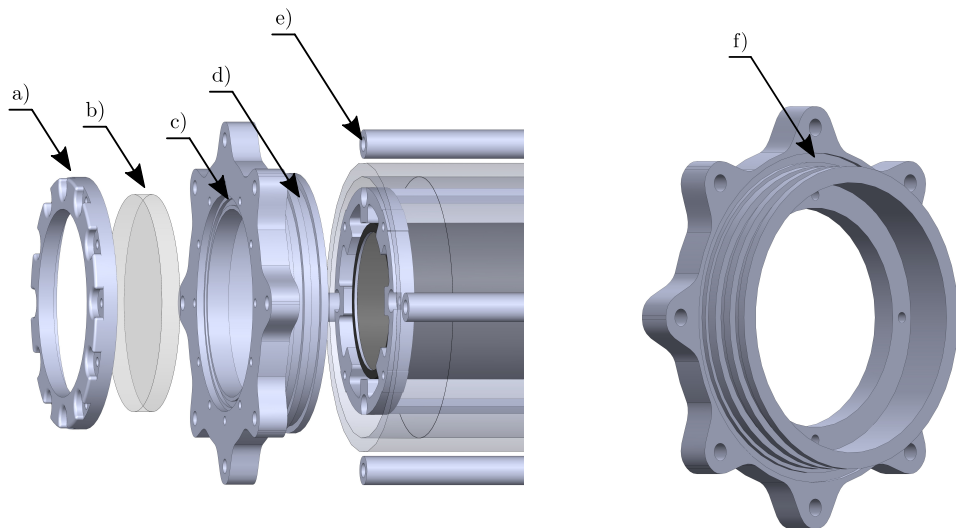


Figura 4.4: Ilustração 3D do sistema de proteção utilizado na tampa frontal.

Na Figura 4.4 é possível observar o sistema de proteção desenvolvido para as tampas. De modo a garantir a estanqueidade do sistema, a abertura para o vidro é protegida através do uso de uma peça 3D, representada por a), que comprime o vidro, representado por b), contra o o-ring¹ colocado na ranhura, representada por c). Relativamente aos o-rings utilizados, entre a tampa e o cilindro é utilizado um o-ring de topo, representado por f), e dois o-rings laterais colocados nas ranhuras, representadas por d). Estes o-rings são utilizados tanto na tampa frontal como na tampa traseira. Por fim, as tampas são presas por pressão ao cilindro através da utilização de varas, representadas por e).

¹Um o-ring é uma junta mecânica com a forma de um toro, projetado para ser assentado numa ranhura e comprimido durante a montagem entre duas ou mais peças. Na presença de pressões baixas, a resiliência natural do o-ring fornece uma vedação entre ambas as peças, impedindo a passagem de fluido. Com o aumento da pressão, o o-ring é empurrado contra a parede da ranhura do lado de baixa pressão, vedando a lacuna entre as peças, impedindo assim a passagem de fluido. No entanto, em casos de pressões extremas, o o-ring deforma-se, o que leva a que este comece a sair da ranhura e a entrar pela lacuna entre as peças, levando à rutura do mesmo e à falha da vedação [103].

Em relação ao vidro, é utilizado o vidro borossilicato, com as propriedades apresentadas na Tabela 4.1, com uma espessura de 10 mm e um diâmetro de 75 mm.

Tabela 4.1: Propriedades do vidro borossilicato [104].

<i>Tensile Strength</i>	280 MPa
<i>Young's Modulus</i>	64 GPa
<i>Density</i>	2.23 g/cm ³
<i>Poisson's Ratio</i>	0.20

Relativamente à tampa traseira, esta é composta por cinco furações, tal como ilustrado na Figura 4.5, para a colocação de três fichas subaquáticas utilizadas para a alimentação (a), controlo e alimentação do sistema de iluminação (b) e comunicação externa (c). Adicionalmente é utilizada uma válvula de ar (d) e um interruptor (e), que servem, respetivamente, para a selagem da estrutura e verificação de fugas e para ligar e desligar o sistema.

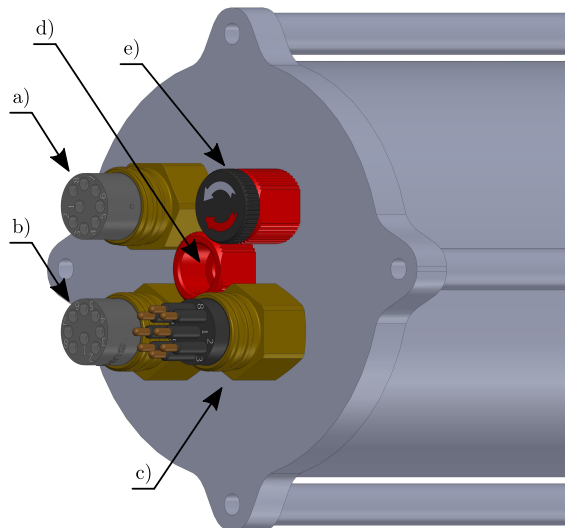


Figura 4.5: Ilustração 3D da tampa traseira da secção 1 do cilindro.

No que diz respeito à secção 2, é de salientar que, uma vez que o cilindro é idêntico ao cilindro da secção 1, apenas com dimensão reduzida, a tampa frontal e a tampa traseira são idênticas às utilizadas no cilindro da secção 1. Assim, na Figura 4.6 é possível observar as peças desenvolvidas para a secção 2 da estrutura. No Apêndice C é apresentado o desenho de cada peça com as medidas mais relevantes.

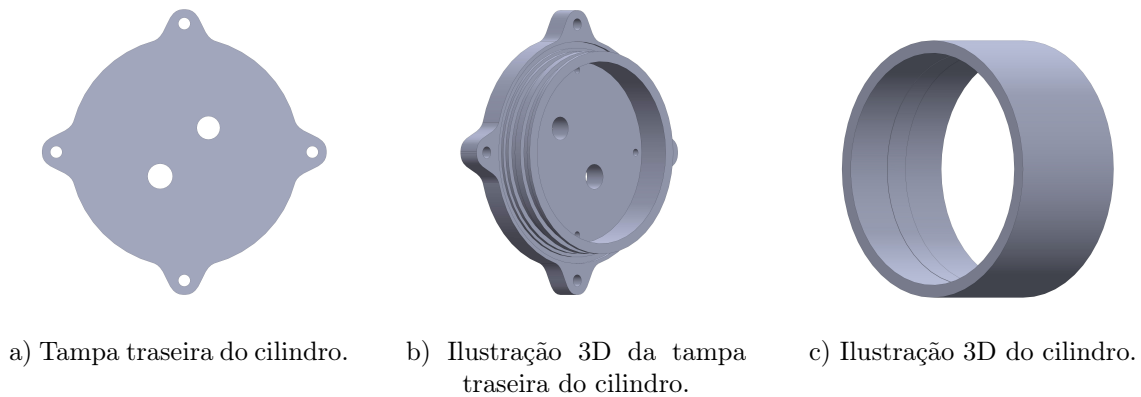


Figura 4.6: Peças desenvolvidas para a secção 2 da estrutura externa.

A tampa traseira da secção 2 é composta por duas furações, como ilustrado na Figura 4.7, para a colocação de: uma ficha subaquática utilizada para o controlo e alimentação do sistema de iluminação e uma válvula de ar utilizada durante a selagem da estrutura e para a verificação de fugas.

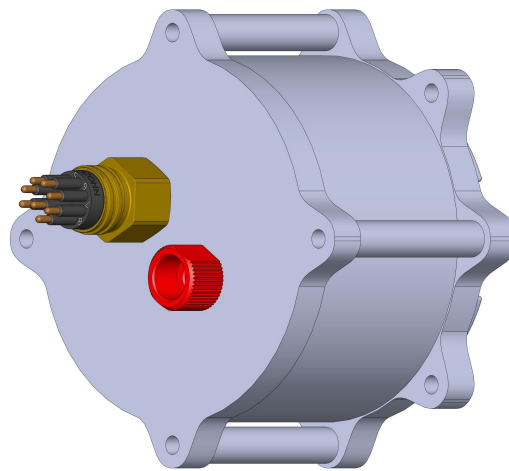


Figura 4.7: Ilustração 3D da tampa traseira da secção 2 do cilindro.

Na Figura 4.8 é possível observar uma ilustração 3D da montagem final da estrutura mecânica. De forma a reforçar a estrutura externa, são utilizados varões para o reforço do fecho das tampas em ambos os cilindros, assim como para a montagem das duas secções, formando uma única estrutura. No Apêndice C é apresentado o desenho dos varões com as medidas mais relevantes.

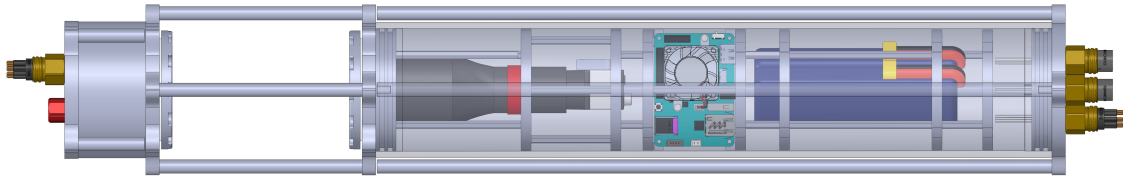


Figura 4.8: Ilustração 3D da estrutura mecânica.

4.2.3 Simulação - *Finite Element Method*

Uma vez desenhada a estrutura mecânica, é utilizado o SOLIDWORKS Flow Simulation para simular o seu comportamento quando aplicadas pressões externas. De forma a dar início à simulação, foi necessário definir fixações e forças externas que interagem com o modelo mecânico. Na Figura 4.9 é possível observar as interações estabelecidas com o modelo.

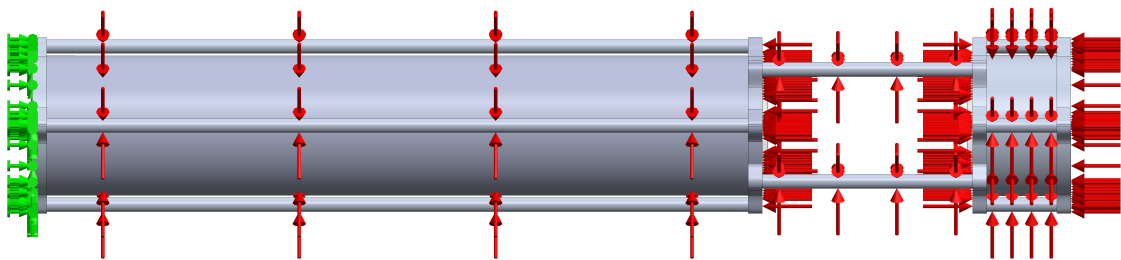


Figura 4.9: Interações definidas com o modelo mecânico considerado na simulação.

- Forças de fixação;
- Forças externas (pressão).

Na Tabela 4.2 encontram-se as configurações utilizadas para a geração da *mesh*² do modelo.

Tabela 4.2: Parâmetros utilizados para a criação da *mesh* do modelo da simulação.

<i>Mesh Type</i>	<i>Curvature-based mesh</i>
<i>Jacobian Points</i>	4
<i>Max Element Size</i>	6.169 68 mm
<i>Min Element Size</i>	1.233 94 mm
<i>Mesh Quality</i>	<i>High</i>

²A *mesh*, é o resultado final do processo de divisão de um modelo geométrico em conjuntos de células com a forma geométrica de um paralelepípedo retangular. Este processo de divisão é denominado de *meshing* e é um dos conceitos fundamentais da análise de elementos finitos (FEA) utilizada pelo SOLIDWORKS Flow Simulation [105].

Para a análise desta estrutura mecânica os resultados de simulação mais relevantes são o *von Mises* e o *displacement*:

- *von Mises*: resultado da simulação que prevê o comportamento das forças internas de um material quando aplicada uma determinada carga. Este apresenta a tensão gerada entre as forças internas que as partículas vizinhas de um material exercem umas sobre as outras. Enquanto o valor dessas forças for inferior ao *yield strength*³ do material, este não apresentará deformações permanentes. No caso de materiais que não possuam deformações elásticas, como é o caso do vidro, o *tensile strength*⁴ é utilizado como referência ao limite das forças internas das partículas do material.
- *Displacement*: resultado da simulação que apresenta a deformação, em mm, do modelo mecânico, onde a anotação URES representa o vetor de deformação \vec{U} , composto pelas componentes \vec{U}_x , \vec{U}_y e \vec{U}_z , que representam o *displacement* em *x*, em *y* e em *z*, respetivamente.

De forma a definir a pressão máxima suportada pela estrutura mecânica, diversas simulações foram realizadas, verificando-se que a uma pressão de 100 bar, o modelo encontra-se no limite de falha mecânica. Como tal, seguem-se os resultados da simulação para uma pressão de 10 bar, pressão estabelecida como requisito do sistema, e para 100 bar.

von Mises — 10 bar

Na Figura 4.10 é possível observar o resultado obtido da simulação de *von Mises*.

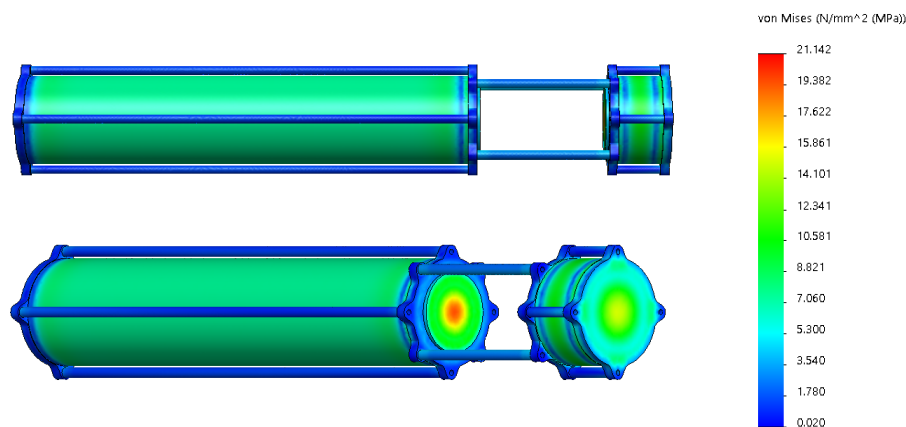


Figura 4.10: Resultado da simulação de *von Mises* para uma pressão externa de 10 bar.

³O *yield strength* representa a tensão máxima que pode ser aplicada num material antes que este comece a apresentar deformações permanentes. Isto é, se a tensão aplicada no material ultrapassar o ponto de *Yield*, este não retornará à sua forma e tamanho original após a libertação da tensão aplicada [106].

⁴O *tensile strength* é utilizado para especificar o ponto sobre o qual o material passa da deformação elástica temporária para a deformação permanente. Assim, pode-se afirmar que o *tensile strength* representa o limite máximo de tensão que um material pode suportar enquanto é esticado antes de sofrer uma falha mecânica [106].

Após a análise do resultado da simulação, verifica-se que o valor máximo de pressão apresentado na escala de *von Mises*, 21.142 MPa, é atingido na parede interna do cilindro da secção 2, como ilustrado na Figura 4.11.

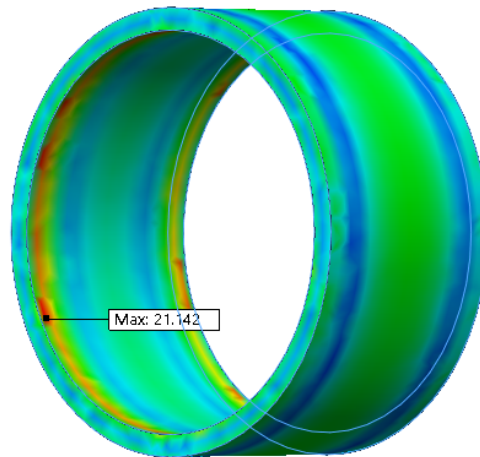


Figura 4.11: Valor máximo de pressão interna atingido na estrutura para uma pressão externa de 10 bar.

Displacement — 10 bar

Na Figura 4.12 é possível observar o resultado obtido da simulação de *displacement*.

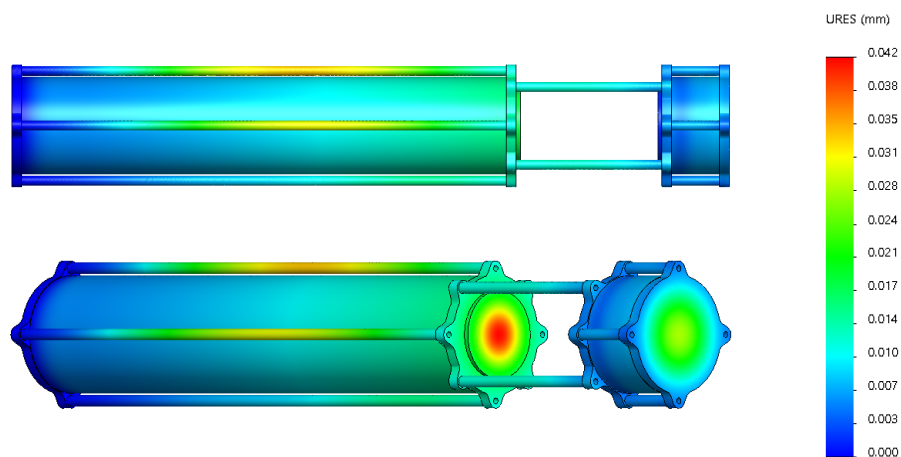


Figura 4.12: Resultado da simulação de *displacement* para uma pressão externa de 10 bar.

Após a análise do resultado da simulação, verifica-se que o valor máximo de deformação apresentado na escala de URES, 0.042 mm, é atingido no vidro, ilustrado na Figura 4.13.

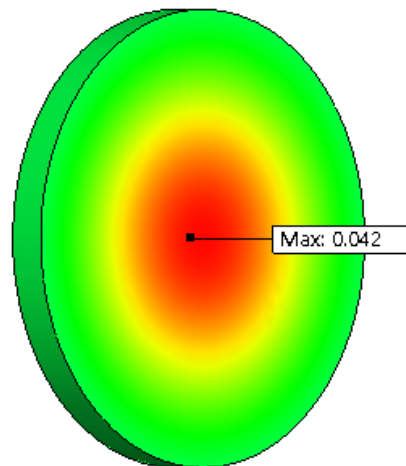


Figura 4.13: Valor máximo de deformação atingido na estrutura para uma pressão externa de 10 bar.

Conclusões — 10 bar

Uma vez que o valor máximo atingido na estrutura mecânica é de uma magnitude bastante inferior ao *yield strength* do alumínio (215 MPa) e ao *tensile strength* do vidro (280 MPa) e, uma vez que o valor máximo da deformação atingido na estrutura mecânica é de aproximadamente 42 μm , pode-se concluir que esta encontra-se corretamente dimensionada para uma pressão de 10 bar.

von Mises — 100 bar

Na Figura 4.14 é possível observar o resultado obtido da simulação de *von Mises*.

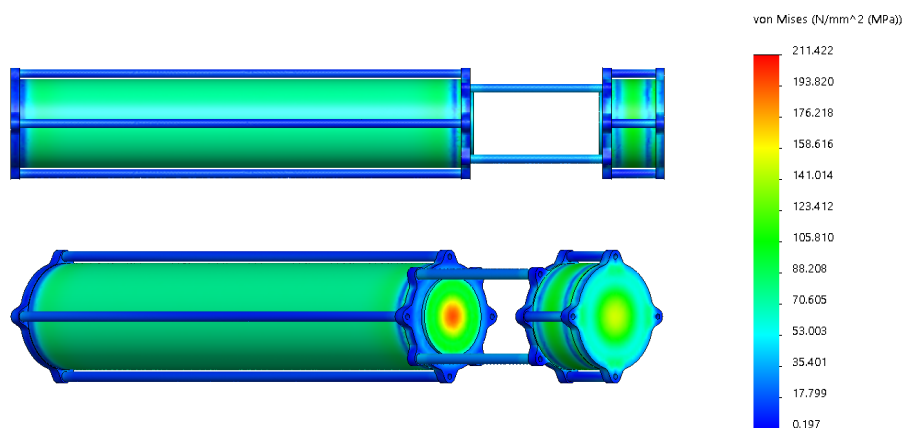


Figura 4.14: Resultado da simulação *von Mises* para uma pressão externa de 100 bar.

Após a análise do resultado da simulação, verifica-se que o valor máximo de pressão apresentado na escala de *von Mises*, 211.422 MPa, é atingido na parede interna do cilindro da secção 2, como ilustrado na Figura 4.15.

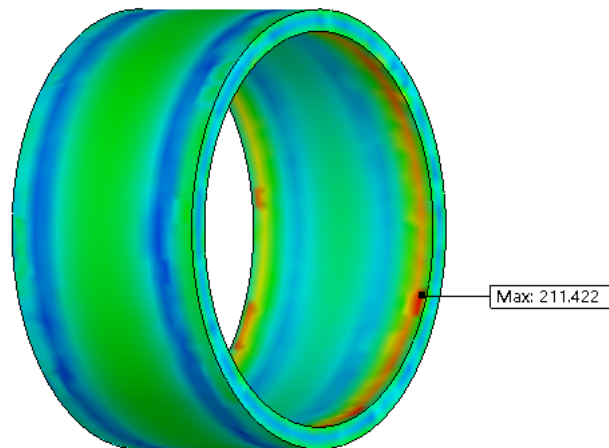


Figura 4.15: Valor máximo de pressão interna atingido na estrutura para uma pressão externa de 100 bar.

Displacement — 100 bar

Na Figura 4.16 é possível observar o resultado obtido da simulação de *displacement*.

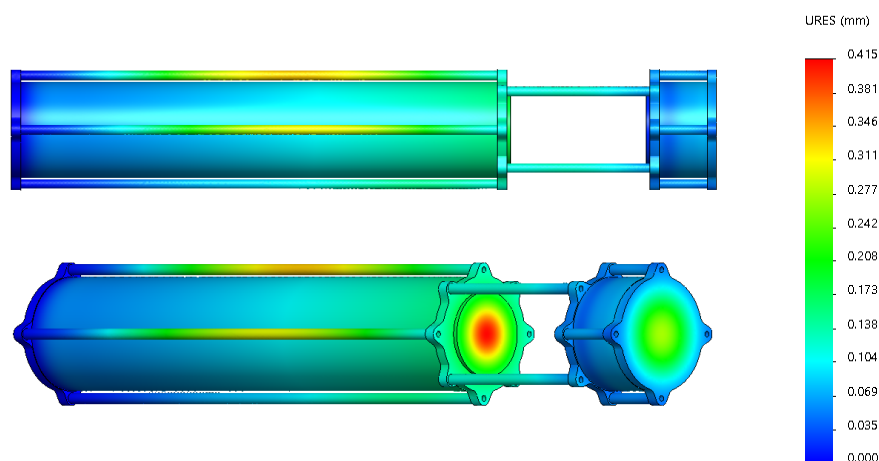


Figura 4.16: Resultado da simulação de *displacement* para uma pressão externa de 100 bar.

Após a análise do resultado da simulação, verifica-se que o valor máximo de deformação apresentado na escala de URES, 0.415 mm, é atingido no vidro, ilustrado na Figura 4.17.

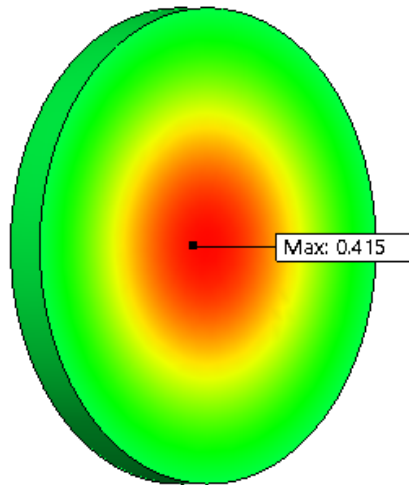


Figura 4.17: Valor máximo de deformação atingido na estrutura para uma pressão externa de 100 bar.

Conclusões — 100 bar

Ao observar o resultado obtido da simulação, verifica-se que o valor máximo da escala de *von Mises* representada na simulação (211.422 MPa) encontra-se no limite do *yield strength* do alumínio (215 MPa), podendo concluir-se que a estrutura mecânica encontra-se no limiar de falha mecânica a uma pressão de 100 bar.

4.2.4 Maquinação e Validação da Estrutura Mecânica

Após a validação da estrutura mecânica através da simulação, procedeu-se à maquinação das peças. Para tal, utilizou-se a CNC do laboratório para realizar as furações e rebordos das tampas. Na Figura 4.18 é possível observar a maquinação da peça representada nas Figuras 4.6 a) e 4.6 b).



Figura 4.18: Maquinação da tampa traseira da secção 2 da estrutura externa.

De forma a proteger a estrutura mecânica de corrosão, procedeu-se à anodização dos cilindros e tampas. Na Figura 4.19 é possível observar o resultado final da estrutura mecânica.



Figura 4.19: Estrutura mecânica.

Relativamente aos testes de estanqueidade da estrutura, foi utilizada uma bomba de vácuo para a remoção do ar existente dentro de cada cilindro, verificando-se que ao fim de algumas horas a pressão se mantinha, confirmando assim que não existiam fugas.

Após esta verificação, a próxima etapa seria a utilização da câmara hiperbárica para a realização de um teste de pressão, de forma a validar a simulação obtida pelo SolidWorks. Uma vez que a estrutura mecânica possui dimensões superiores às suportadas pela câmara hiperbárica do laboratório, optou-se, alternativamente, por submergir a estrutura mecânica no tanque do laboratório, colocando a estrutura a uma profundidade de 8 m.

Na Figura 4.20 é possível observar o teste de submersão da estrutura mecânica.

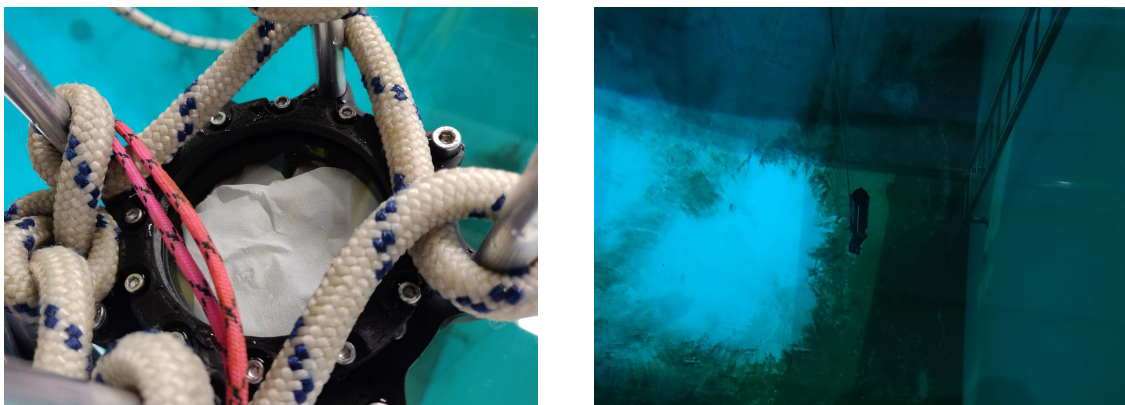


Figura 4.20: Teste de submersão da estrutura mecânica a uma profundidade de 8 m.

Adicionalmente, foram colocadas no interior de cada cilindro tiras finas de papel de forma a verificar se existiriam fugas de água para o interior. Ao fim de 1 dia, removeu-se a estrutura do tanque e procedeu-se à sua abertura, verificando que o papel não apresentava sinais de humidade.

4.3 Hardware

Ao longo desta secção é detalhado o desenvolvimento das Placas de Circuito Impresso (PCBs) desenvolvidas para este sistema sendo estas a placa de BMS e a placa de iluminação, apresentando os seus esquemas e *layouts* finais. No Apêndice D é apresentado o esquema elétrico detalhado da PCB do BMS. Ambas as placas foram desenhadas com recurso ao *software* KiCad⁵, que permite a visualização 3D das PCBs, podendo assim, obter uma ideia aproximada das dimensões.

4.3.1 BMS

Desenvolvimento do Esquema

Considerando que o principal objetivo é a monitorização de duas baterias de lítio em série, é utilizado o IC (do inglês *integrated circuit*) LTC6803-4 [107], uma vez que este é capaz de realizar a monitorização das baterias. Este IC comunica com um microcontrolador através de um barramento SPI, sendo possível escolher diferentes modos de funcionamento e obter a tensão de cada célula. Na Figura 4.21 é possível verificar as ligações realizadas para o controlo e a comunicação deste IC.

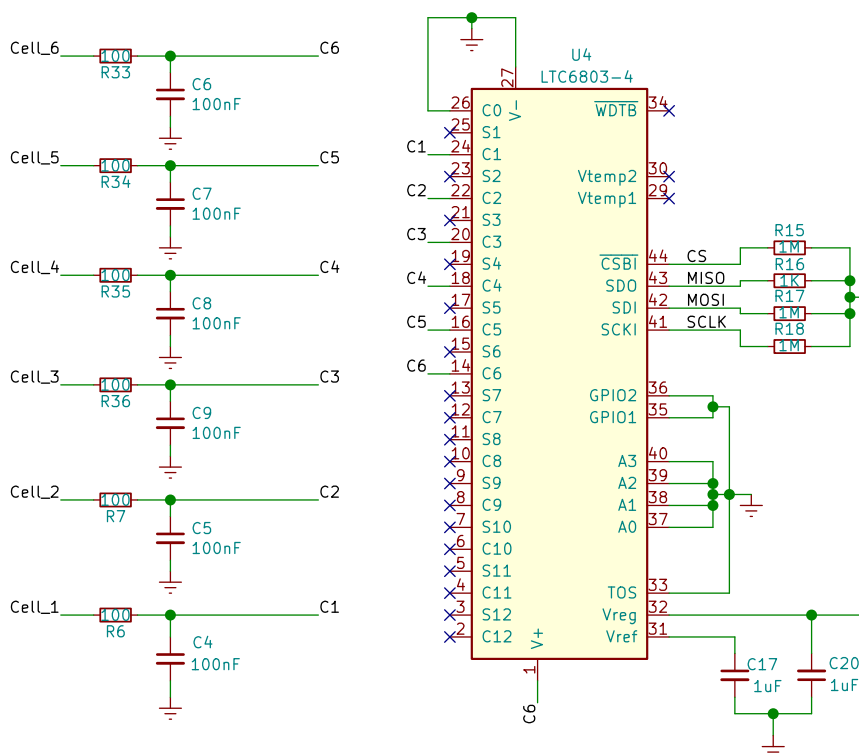


Figura 4.21: Esquema de ligação do IC de monitorização das baterias.

⁵O KiCad é um programa CAD *open-source* concebido para a simulação e desenvolvimento de placas de circuito impresso.

De acordo com o que é recomendado pelo fabricante, foram implementados diversos filtros passa-baixo com uma atenuação de -30 dB a uma frequência de corte de 500 kHz em cada entrada de leitura de célula do IC com o intuito de minimizar o erro introduzido na conversão da tensão. De modo a permitir o funcionamento autónomo deste BMS, é utilizado o IC LTC2955IDDB [108], representado na Figura 4.22, capaz de ligar e desligar o sistema através de um botão ou de uma interrupção externa proveniente de um microcontrolador.

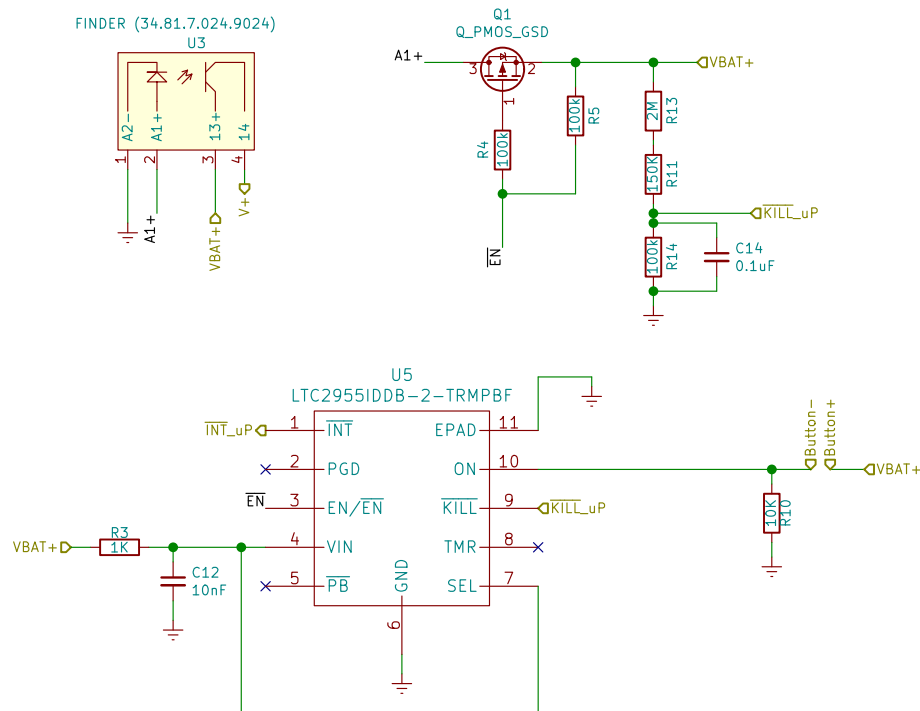


Figura 4.22: Esquema de ligação do IC LTC2955IDDB.

Este IC possui dois pinos de controlo: o pino ON, controlado por um botão, e o pino KILL controlado por um microcontrolador. Através dos sinais recebidos nesses dois pinos, a saída do pino de ativação EN é manipulada através de um MOSFET (do inglês *Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor*) de canal P, que por sua vez atua num relé, tornando possível ligar e desligar o sistema. Por motivos de segurança, é utilizado um divisor de tensão no pino KILL que irá, independentemente da situação, desativar o sistema na presença de um decréscimo da tensão das baterias a partir de um determinado *threshold*.

Relativamente aos conversores de tensão, uma vez que as baterias utilizadas possuem uma tensão total de 22.2 V e uma capacidade de 5200 mAh, é necessária a utilização de dois conversores abaixadores (*step-down converter*), uma vez que neste sistema são utilizados componentes com tensões entre os 5 V e 12 V. Desta forma, utiliza-se o IC Murata IW1136 [109], destinado à conversão de 22.2 V para 5 V e o IC R-78E12-0.5 [110], destinado à conversão de 22.2 V para 12 V. Na Figura 4.23 é possível verificar as ligações realizadas para estes dois componentes.

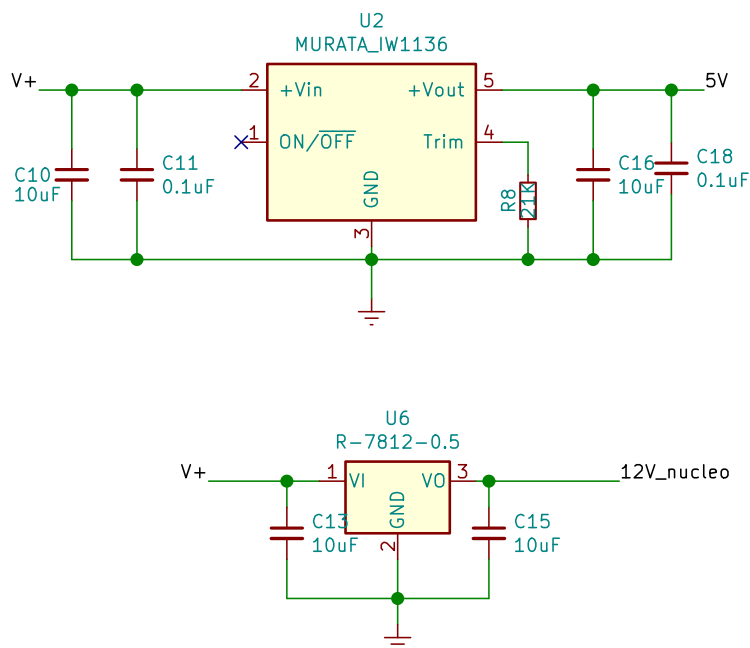


Figura 4.23: Esquema de ligação dos dois conversores abaixadores de tensão.

Para o controlo do sistema de monitorização de baterias é utilizada uma placa de desenvolvimento Núcleo F303k8 [111], responsável pelo controlo de todos os ICs, pela monitorização dos parâmetros das baterias e comunicação com a SBC. Na Figura 4.24 é possível observar as ligações realizadas.

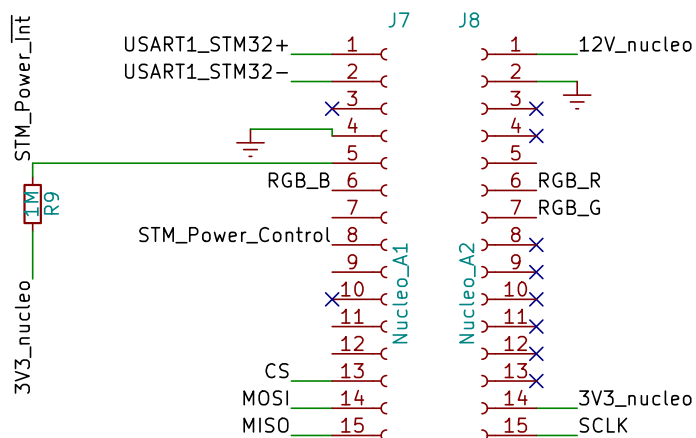


Figura 4.24: Esquema de ligação do microcontrolador.

A comunicação entre o microcontrolador e a SBC é uma comunicação série assíncrona. Uma vez que todos os pinos da SBC apenas suportam tensões até 1.8 V, foi necessário utilizar um conversor de tensão bidirecional TXS0102 [112], representado na Figura 4.25.

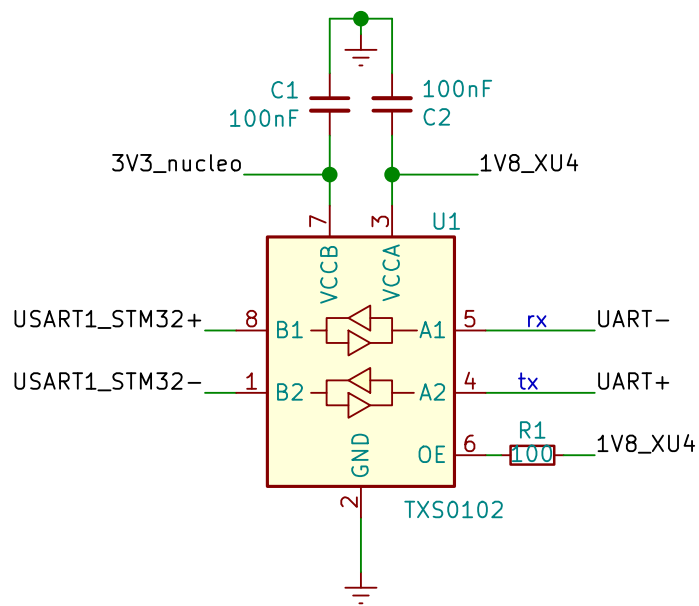


Figura 4.25: Esquema de ligação do IC de conversor de tensão.

Desenho da Placa de Circuito Impresso

Uma vez que o componente de conversão de tensão da SBC (Murata IW1136) apresenta perdas até 6 W, graças à sua eficiência de aproximadamente 85% para o ponto de funcionamento imposto pela SBC e baterias ($V_{in} \approx 22.2 \text{ V}$, $V_{out} \approx 5 \text{ V}$ e $I_{out} \approx 1.5 \text{ A}$) [109], a PCB é desenhada com uma forma semicircular num dos seus lados de modo a que seja possível, através do uso de dissipadores, dissipar o calor gerado para o cilindro.

Na Figura 4.26 é possível observar não só a dimensão da PCB do BMS em relação à dimensão interna do cilindro como também as visões superior e inferior da PCB gerada pelo *software* KiCad.

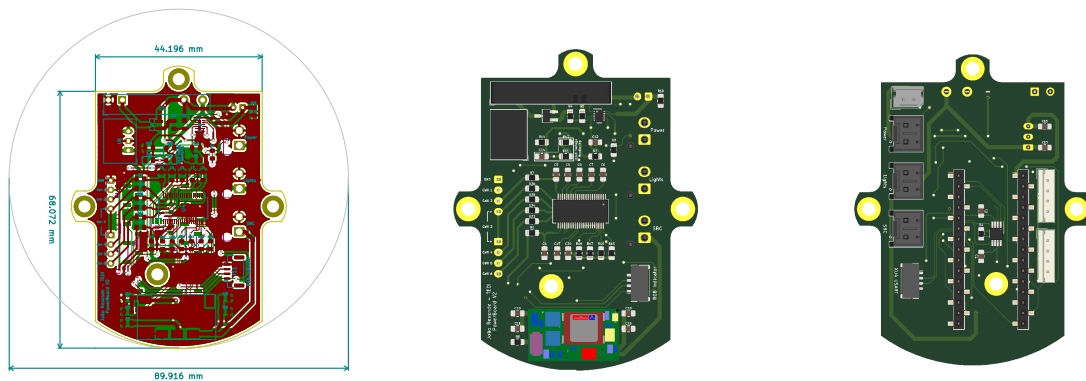


Figura 4.26: Dimensão e visão superior e inferior da PCB do BMS.

Na Figura 4.27 é possível observar o resultado final da PCB do BMS após a fabricação e a montagem de todos os componentes.

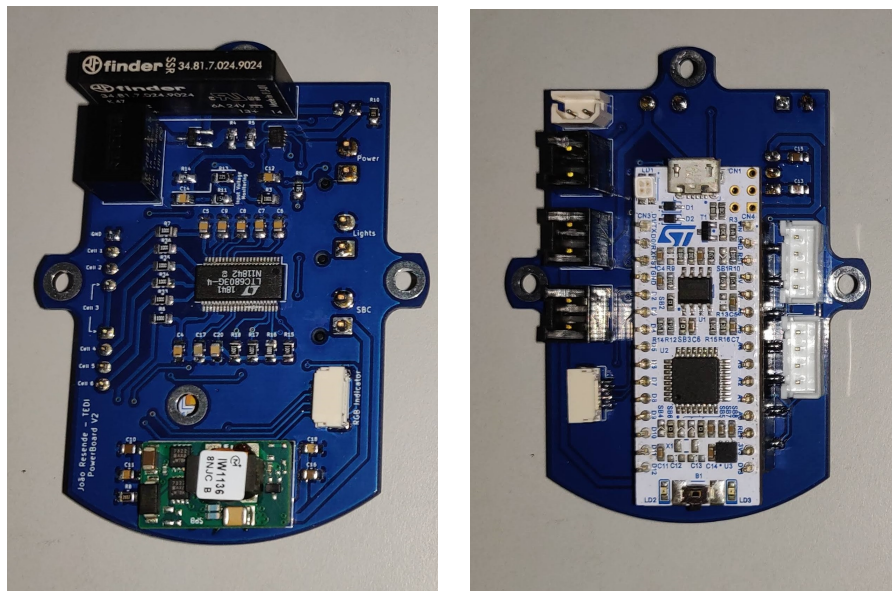


Figura 4.27: PCB do BMS.

4.3.2 Placa de Iluminação

Desenvolvimento do Esquema

Relativamente ao sistema de iluminação, projetou-se uma placa de LEDs compatível com o SLS. Esta é composta por 21 LEDs de alta potência separados por 3 linhas de iluminação (A, B e C), cada uma destas constituída por um conjunto de 7 LEDs.

De acordo com os requisitos do sistema, os LEDs apresentam uma temperatura de cor de 6500 K, um ângulo de visão de 125° e um fluxo luminoso de 480 lm [113]. Na Figura 4.28 é possível observar o esquema de ligações da placa do sistema de iluminação.

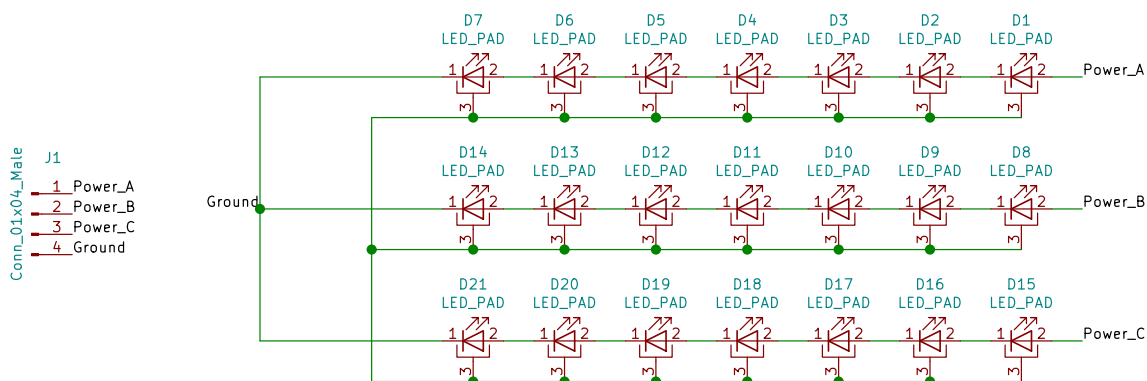


Figura 4.28: Esquema de ligação dos LEDs da placa do sistema de iluminação.

Desenho da Placa de Circuito Impresso

De forma a homogeneizar a luz emitida, os LEDs são dispostos num padrão circular. Na Figura 4.29 é possível observar não só a dimensão da PCB do sistema de iluminação em relação à dimensão interna do cilindro de iluminação como também as visões superior e inferior da PCB gerada pelo *software* KiCad.

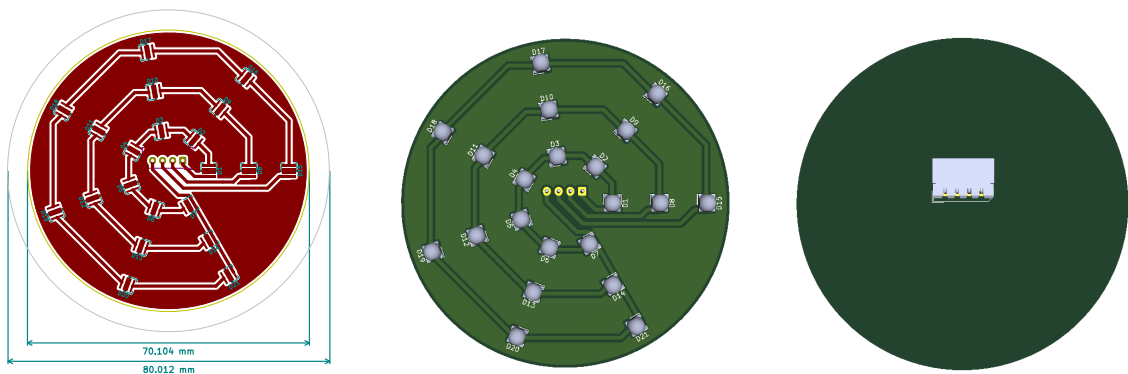


Figura 4.29: Dimensão e visão superior e inferior da PCB do sistema de iluminação.

Na Figura 4.30 é possível observar o resultado final da PCB de iluminação após a montagem de todos os componentes.

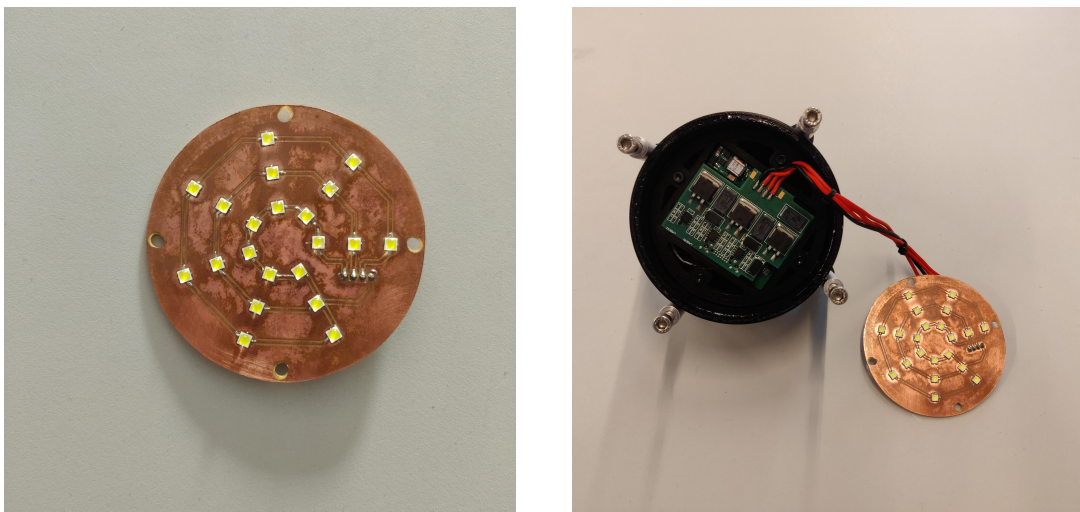


Figura 4.30: PCB do sistema de iluminação.

4.4 Software

Ao longo desta secção é detalhado o *software* desenvolvido para a placa do BMS e para a SBC, seguindo a arquitetura de *software* presente na Figura 4.31.

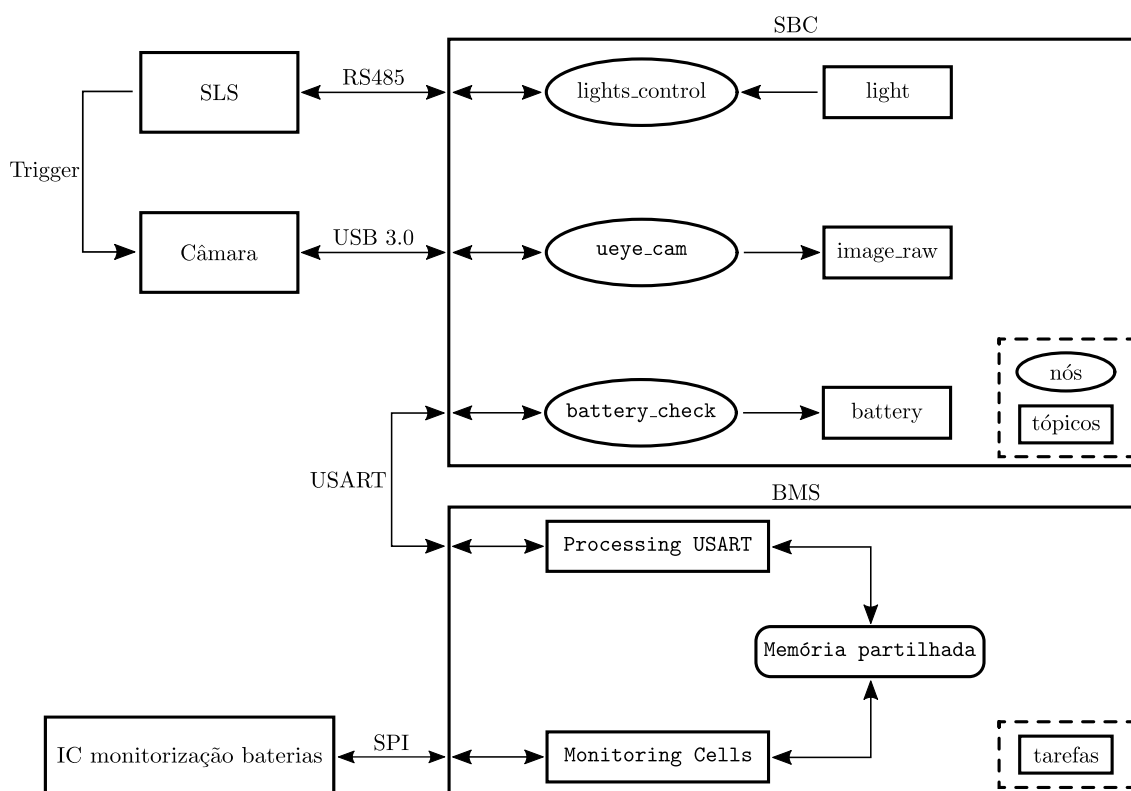


Figura 4.31: Arquitetura de *software* detalhada.

No que diz respeito ao *software* desenvolvido para a SBC, como representado na Figura 4.31, são utilizados três nós de ROS: o `lights_control` para o controlo do sistema de iluminação, que comunica com o SLS através de um protocolo de comunicação RS485; o `ueye_cam` para o controlo e aquisição de imagens, que comunica com a câmara através de um protocolo USB 3.0; e o `battery_check` para a monitorização e controlo do sistema de monitorização das baterias, que comunica com o BMS através de um protocolo USART.

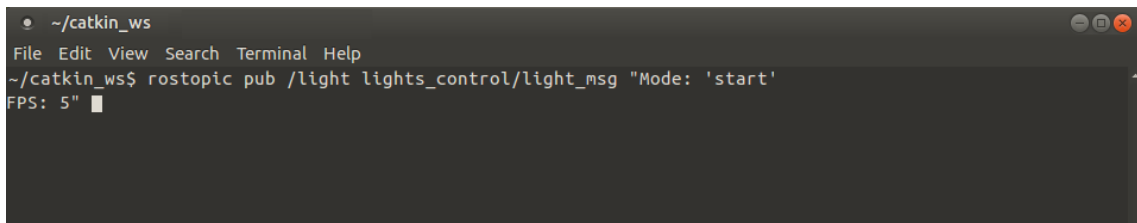
Relativamente ao *software* desenvolvido para o BMS, como representado na Figura 4.31, são utilizadas duas tarefas: uma dedicada à monitorização das baterias, denominada `Monitoring Cells`, que comunica com o IC de balanceamento das baterias através de um protocolo SPI; e outra dedicada ao processamento de dados, denominada `Processing USART`, que comunica com a SBC através de um protocolo USART. Estas duas tarefas partilham uma secção de memória que contém informação relativa ao estado das baterias.

4.4.1 SBC

Quanto ao *software* desenvolvido para a SBC, o nó de ROS responsável pelo controlo do sistema de iluminação, `lights_control`, utiliza uma mensagem personalizada para a publicação de comandos que se pretendem executar no SLS, podendo esta ter dois modos:

- **Mode:** `start` ou `stop`;
- **FPS:** taxa de disparo dos LEDs que se pretende utilizar para a aquisição das imagens, podendo ser escolhidos quatro valores distintos 5 Hz, 10 Hz, 15 Hz e 20 Hz.

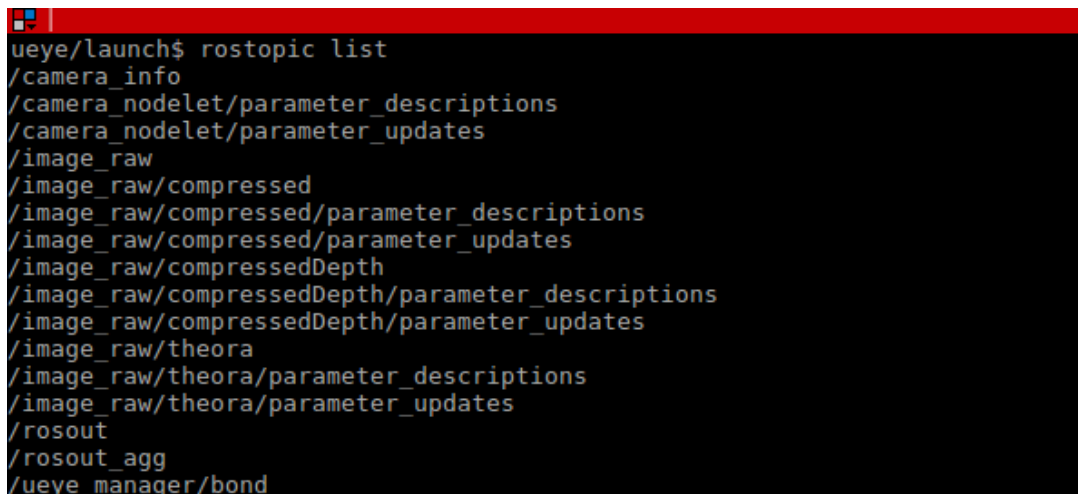
Na Figura 4.32 é possível observar um exemplo de uma publicação do comando de `start` e frequência de disparo do sistema de iluminação de 5 Hz.



```
~/catkin_ws
File Edit View Search Terminal Help
~/catkin_ws$ rostopic pub /light lights_control/light_msg "Mode: 'start'
FPS: 5"
```

Figura 4.32: Exemplo de uma publicação do comando de `start` no tópico `light` do nó `lights_control`.

No que diz respeito ao *software* de controlo e aquisição de imagens, `ueye_cam`, é utilizado um nó *open-source* que utiliza a API (do inglês *application programming interface*), das câmaras IDS (do inglês *Imaging Development Systems*) [97].



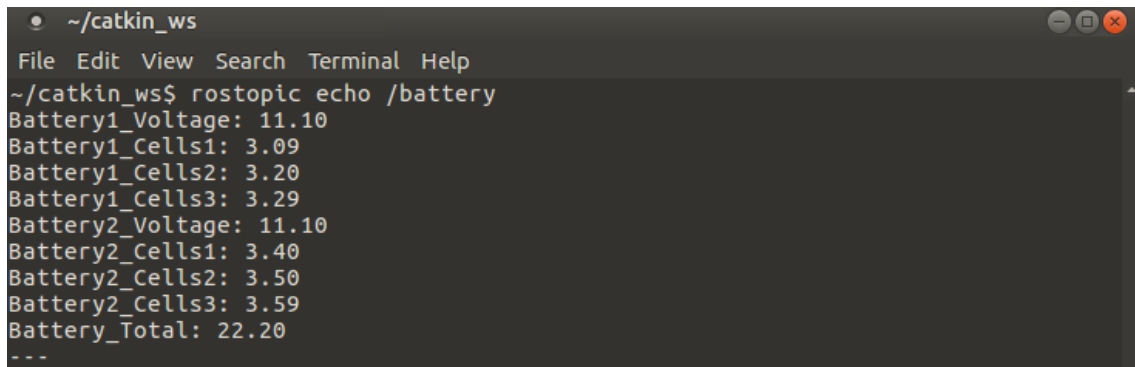
```
ueye/launch$ rostopic list
/camera_info
/camera_nodelet/parameter_descriptions
/camera_nodelet/parameter_updates
/image_raw
/image_raw/compressed
/image_raw/compressed/parameter_descriptions
/image_raw/compressed/parameter_updates
/image_raw/compressedDepth
/image_raw/compressedDepth/parameter_descriptions
/image_raw/compressedDepth/parameter_updates
/image_raw/theora
/image_raw/theora/parameter_descriptions
/image_raw/theora/parameter_updates
/rosout
/rosout_agg
/ueye_manager/bond
```

Figura 4.33: Representação dos tópicos publicados pelo nó `ueye_cam`.

Após à ativação do *trigger* pelo SLS, o nó `ueye_cam` dá início à aquisição de imagens, publicando as mesmas nos tópicos `image_raw` e `image_raw/compressed`. No momento

de gravar as imagens na unidade de armazenamento, é utilizado o *package* `rosvbag` para a gravação das imagens do tópico escolhido.

Por fim, em relação ao *software* utilizado para o controlo do sistema de monitorização de baterias, `battery_check`, é utilizada uma mensagem personalizada para a publicação da tensões das baterias, que é publicada no tópico `battery` a cada 5s. Na Figura 4.34 é possível observar um exemplo de uma mensagem publicada pelo tópico `battery`.

A terminal window titled '~ /catkin_ws' with a menu bar (File, Edit, View, Search, Terminal, Help). The command '~ /catkin_ws\$ rostopic echo /battery' has been executed, resulting in the following output: Battery1_Voltage: 11.10, Battery1_Cells1: 3.09, Battery1_Cells2: 3.20, Battery1_Cells3: 3.29, Battery2_Voltage: 11.10, Battery2_Cells1: 3.40, Battery2_Cells2: 3.50, Battery2_Cells3: 3.59, Battery_Total: 22.20, followed by three dashes '---'.

```
~/catkin_ws
File Edit View Search Terminal Help
~/catkin_ws$ rostopic echo /battery
Battery1_Voltage: 11.10
Battery1_Cells1: 3.09
Battery1_Cells2: 3.20
Battery1_Cells3: 3.29
Battery2_Voltage: 11.10
Battery2_Cells1: 3.40
Battery2_Cells2: 3.50
Battery2_Cells3: 3.59
Battery_Total: 22.20
---
```

Figura 4.34: Exemplo de uma mensagem publicada pelo tópico ROS do sistema de monitorização das baterias.

4.4.2 BMS

Relativamente ao *software* desenvolvido para o microcontrolador, este começa por efetuar as configurações necessárias para o correto funcionamento do protocolo SPI e do protocolo USART, responsáveis pela comunicação com o IC LTC2955IDDB e a SBC, respetivamente.

De seguida, são configuradas as duas tarefas. À tarefa `Monitoring Cells` é aplicada uma prioridade superior à da tarefa `Processing USART`. Uma vez que estas tarefas partilham uma secção de memória, é utilizado um mecanismo de exclusão mútua *mutex* (do inglês *Mutual Exclusion*) de forma a evitar o acesso simultâneo à secção de memória, garantindo assim que o acesso por parte de cada tarefa é realizada de forma atómica.

Relativamente à tarefa `Monitoring Cells`, esta é executada a cada 5s. Nesta é realizada a leitura da tensão de cada célula, guardando os valores obtidos na secção de memória partilhada.

Após a leitura da tensão de cada célula é realizada uma análise aos valores obtidos, de forma a que, na presença de um valor de tensão abaixo de um dado *threshold*, seja possível desligar o sistema, através de uma ligação ao pino `KILL` do IC LTC2955IDDB.

Cada vez que é recebida informação proveniente da SBC, é utilizada a técnica de *deferred handling* de forma a minimizar o tempo utilizado na execução da interrupção da USART. Nomeadamente, nesta interrupção, quando é recebido o último *byte* de uma trama, esta é colocada numa fila de mensagens para posterior processamento pela tarefa `Processing USART`.

No que diz respeito à tarefa `Processing USART`, esta lê continuamente a fila de mensagens, analisando as tramas recebidas de forma a enviar a resposta correspondente ao pedido proveniente da SBC. Uma vez que a leitura da fila de mensagens é realizada de forma bloqueante, a tarefa é suspensa e resumida automaticamente conforme a presença de tramas na fila de mensagens.

Na Figura 4.35 é possível observar uma ilustração do comportamento do *software* para três exemplos diferentes, pelo que se pode verificar que, no intervalo:

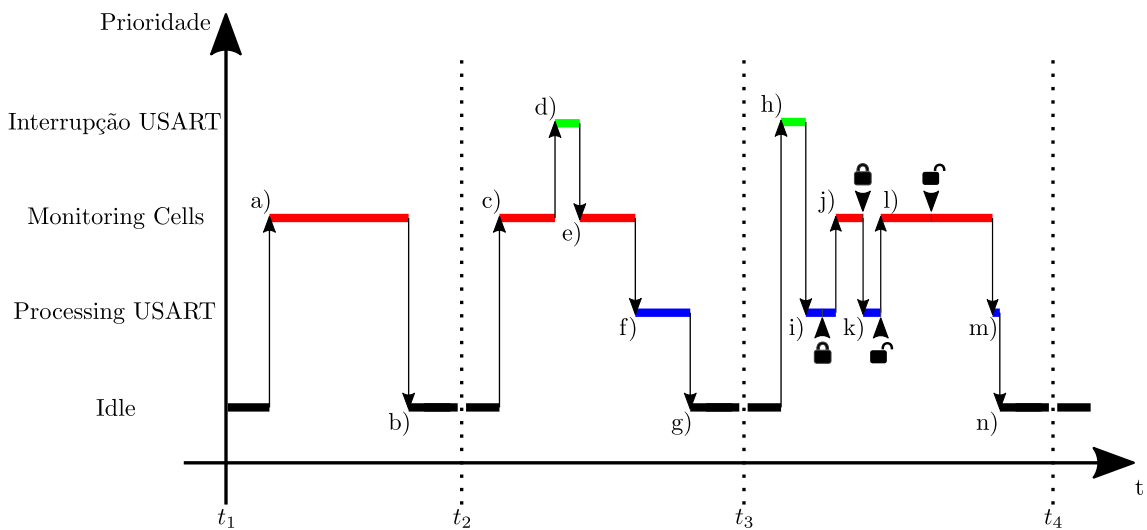


Figura 4.35: Cenários possíveis para a execução das tarefas.

- $[t_1; t_2]$: é executada, inicialmente, a tarefa `Idle`. Esta é uma tarefa criada automaticamente pelo FreeRTOS quando o escalonador é iniciado, servindo de garantia ao FreeRTOS que haja pelo menos uma tarefa ativa. Esta tarefa é executada até ao momento em que haja preempção por outra tarefa, neste caso, pela tarefa `Monitoring Cells` (evento a)). Terminada a tarefa `Monitoring Cells`, esta é suspensa até ao próximo período de execução e é resumida a tarefa `Idle` (evento b)).
- $[t_2; t_3]$: durante a execução da tarefa `Monitoring Cells`, é gerada uma interrupção da USART onde é recebido o último *byte* de uma trama (evento d)). Como indicado anteriormente, após a colocação da trama na fila de mensagens pela interrupção, a tarefa `Processing USART` é resumida. Contudo, uma vez que a tarefa `Monitoring Cells` não terminou, e como esta possuiu uma prioridade mais elevada, esta continua a ser executada (evento e)). A tarefa `Processing USART` apenas é executada após terminada a tarefa `Monitoring Cells` (evento f)). Terminada a tarefa `Processing USART`, esta é suspensa novamente, uma vez que não existem mais tramas por processar, e é resumida a tarefa `Idle` (evento g)).

- $[t_3; t_4]$: durante a execução da tarefa `Idle`, é gerada uma interrupção da `USART` onde é recebido o último *byte* de uma trama (evento `h`)), o que leva à execução da tarefa `Processing USART` após o término da interrupção (evento `i`)). Durante a execução da tarefa, de forma a aceder aos dados necessários para responder ao pedido da `SBS`, o *mutex* da memória partilhada é bloqueado. Contudo, uma vez que a tarefa `Monitoring Cells` é executada a cada 5 s, e como esta possui uma prioridade superior à tarefa `Processing USART`, esta é executada a meio do processo de leitura da memória que a tarefa `Processing USART` estava a realizar (evento `j`)). Assim, a tarefa `Monitoring Cells` realiza uma leitura às tensões das baterias e tenta bloquear o *mutex*, de forma a atualizar a informação. Uma vez que o *mutex* já se encontra bloqueado pela tarefa `Processing USART`, a tarefa `Monitoring Cells` entra em suspensão, permitindo a execução da tarefa `Processing USART` (evento `k`)), até que esta liberte o *mutex*. Uma vez libertado, a tarefa `Processing USART` é imediatamente suspensa de modo a permitir a execução da tarefa `Monitoring Cells` até ao seu término. Por fim, são executadas as restantes instruções da tarefa `Processing USART` (evento `m`)). Terminada a tarefa, esta é suspensa novamente e é resumida a tarefa `Idle` (evento `n`)).

Relativamente ao protocolo de comunicação implementado entre o microcontrolador e a `SBC`, utilizou-se o formato presente na Tabela 4.3 para a trama de envio de pedidos.

Tabela 4.3: Trama de pedido.

Byte	0	1	2	3
	START	Comando	CRC	CRC

- Byte 0 : indicador de início de trama (0x10);
- Byte 1 : comando referente ao pedido, podendo este ser:
 - **0x01**: Leitura de tensão;
 - **0x02**: Leitura de célula;
 - **0x03**: Leitura de status.
- Byte 2..3: verificação cíclica de redundância.

Uma vez recebido um pedido proveniente da `SBC`, e no caso de este ter sido recebido corretamente, o `BMS` responde com uma trama de resposta que utiliza o formato presente na Tabela 4.4.

Tabela 4.4: Trama de resposta.

0	1	2	3		n-2	n-1	n
START	Comando	NDados	Dados	...	Dados	CRC	CRC

- Byte 0 : indicador de inicio de trama (0x10);
- Byte 1 : comando referente ao pedido, idêntico ao da trama de pedido;
- Byte 2: número de dados enviados;
- Byte 3..n-2: dados;
- Byte n-1..n: verificação cíclica de redundância.

Relativamente aos dados de resposta ao pedido de leitura de tensão, é possível observar na Tabela 4.5 a composição da trama de resposta, onde são enviados um total de 6 *bytes* de dados, dois *bytes* [3; 4] com a parte inteira e decimal referentes à tensão da primeira bateria, dois *bytes* [5; 6] com a parte inteira e decimal referentes à tensão da segunda bateria e dois *bytes* [7; 8] com a parte inteira e decimal referentes à tensão total.

Tabela 4.5: Trama de resposta ao pedido leitura de tensão.

Byte	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
	0x10	0x01	6	Dados	Dados	Dados	Dados	Dados	Dados	CRC	CRC

No que diz respeito aos dados de resposta ao pedido de leitura de célula, o formato da trama de resposta é idêntico ao do pedido leitura de tensão. Contudo, a quantidade de *bytes* de dados aumenta de 6 para 12 uma vez que existe um total de 6 células e que para a tensão de cada célula são enviados dois *bytes*, um com a parte inteira e outro com a parte decimal.

Por fim, quanto aos dados de resposta ao pedido de leitura de *status*, é possível observar na Tabela 4.6 a composição da trama de resposta, onde é enviado um *byte* referente ao estado atual do sistema.

Tabela 4.6: Trama de resposta ao pedido de leitura de status.

Byte	0	1	2	3	4	5
	0x10	0x03	1	Dados	CRC	CRC

Este *byte* pode tomar os seguintes valores, referentes ao estado global do sistema:

- **0x01**: BOM, indicativo de que a tensão das células é superior a 3.5 V;
- **0x02**: MAU, indicativo de que a tensão das células é inferior a 3.5 V;
- **0x03**: CRÍTICO, indicativo de que a tensão das células é inferior a 3.1 V.

No caso de o BMS não receber corretamente um pedido, este envia uma trama de erro que utiliza o formato presente na Tabela 4.7.

Tabela 4.7: Trama de erro.

Byte	0	1
	START	0xFF

- Byte 0 : indicador de inicio de trama (0x10);
- Byte 1 : comando fixo de erro, (0xFF).

4.5 Resultados Experimentais

4.5.1 Testes Laboratoriais

De forma a validar o funcionamento do sistema, decidiu-se eclodir um elevado número de artémias⁶, uma vez que a eclosão destes organismos em laboratório é acessível. Além disso, estes também possuem dimensões que se enquadram no intervalo de dimensões dos organismos que se pretende captar com o sistema, como é possível observar na Tabela 4.8. Na Figura 4.36 é possível observar o *setup* de incubação utilizado.

Tabela 4.8: Comprimento total dos diferentes estágios de uma artémia (adaptado de [115]).

	Comprimento Total
Cisto de artémia	160 μm a 250 μm
Artémia recentemente eclodida	400 μm a 500 μm
Artémia adulta	> 1 cm

⁶A Artémia é um grupo de pequenos crustáceos aquáticos. Estes são organismos com tamanho variado que habitam em regiões de água salgada. Normalmente, são utilizados na aquacultura como alimento para outras espécies, uma vez que estes organismos produzem óvulos dormentes, conhecidos como cistos, que podem ser armazenados indefinidamente [114].



Figura 4.36: *Setup* de incubação de artêmias instalado no LSA.

Terminado o processo de incubação de aproximadamente 48 h, colocou-se o sistema num pequeno tanque com água salgada e verteu-se uma pequena quantidade de artêmias. Na Figura 4.37 é possível observar uma imagem obtida através do sistema, sendo possível verificar que o sistema é capaz de captar imagens de alta resolução de organismos com dimensões reduzidas.

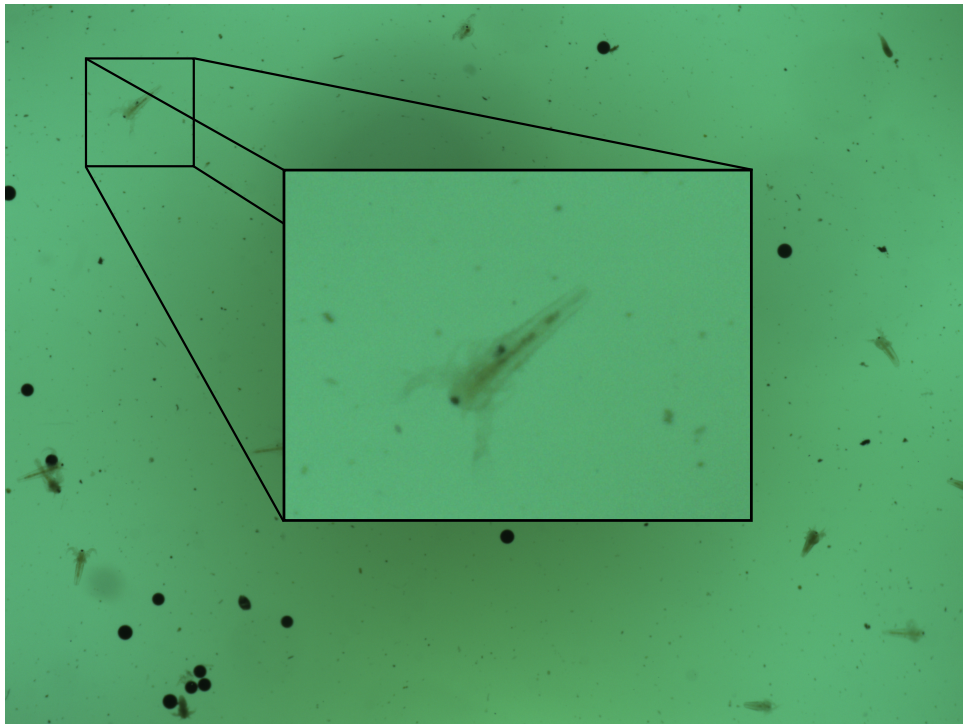
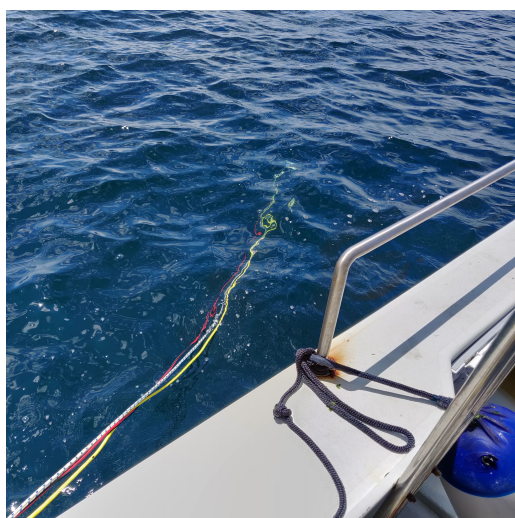


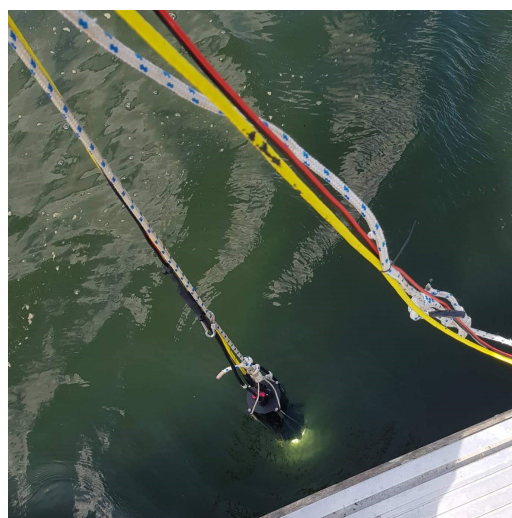
Figura 4.37: Resultado da captação de uma imagem em laboratório.

4.5.2 Testes em Cenário Real

De forma a avaliar o sistema em condições reais, foram realizadas duas missões, uma em água salina e outra em água doce. Assim, relativamente à missão de água salina, o sistema foi submerso em três locais diferentes — norte, centro e sul da costa de Esposende. O mesmo foi executado na missão de água doce, onde o sistema foi submerso em três locais diferentes ao longo do rio Douro, perto de Avintes, na cidade de Vila Nova de Gaia. Na Figura 4.38 é possível observar o sistema submerso durante a realização das missões.



a) Submersão do sistema durante a missão de Esposende.

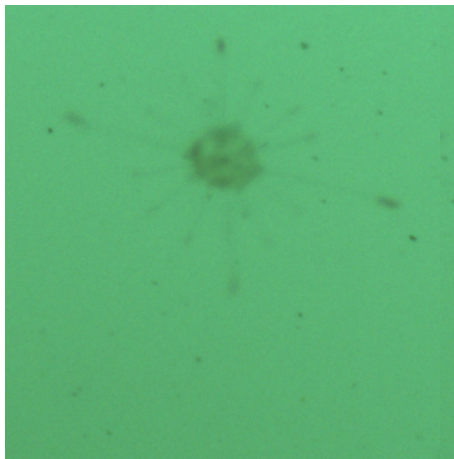


b) Submersão do sistema durante a missão de Avintes.

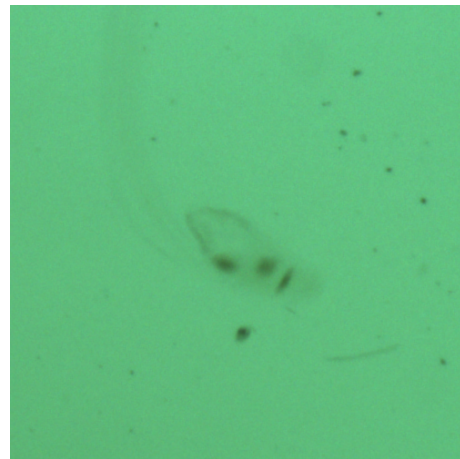
Figura 4.38: Testes de aquisição de imagens em cenário real.

Em Esposende foi realizada uma aquisição de 9 min e 37 s no qual foram analisados um total de 3.79 L de amostra, correspondendo a um total de 2892 imagens capturadas, ocupando um total de 48.6 GB na unidade de armazenamento. Destas 2892 imagens apenas 42 apresentavam possíveis indivíduos, constituindo uma percentagem de 1.452 %. Em Avintes, foi realizada uma aquisição de 11 min e 6 s no qual um total de 4.37 L de amostra, correspondendo a um total de 3336 imagens capturadas, ocupando um total de 56.2 GB na unidade de armazenamento. Destas 3336 apenas 39 apresentava possíveis indivíduos, constituindo uma percentagem de 1.17 %.

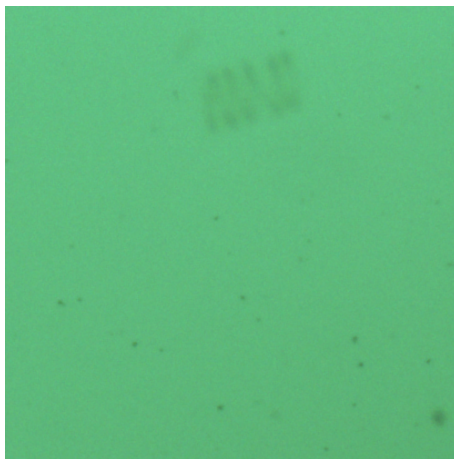
Na Figura 4.39 é possível observar alguns dos organismos capturados pelo sistema desenvolvido em ambas as missões realizadas, assim como a sua correspondente classificação realizada pela Dr. Sandra Ramos, investigadora do CIIMAR.



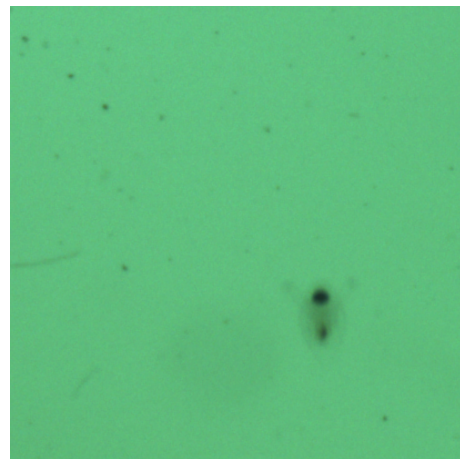
a) Phytoplankton.



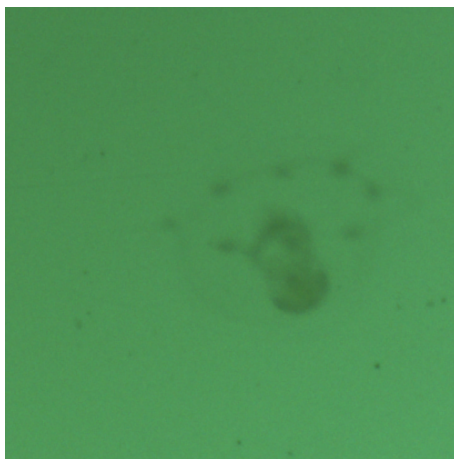
b) Larvacean.



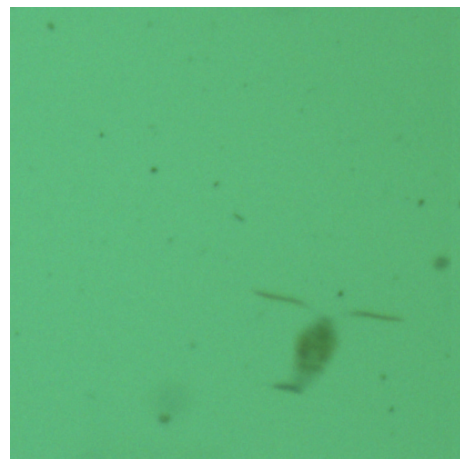
c) Diatom.



d) Cladocera.



e) Hydrozoa.



f) Copepod.

Figura 4.39: Classificação de alguns dos organismos capturados pelo sistema desenvolvido.

4.6 Melhorias Implementadas

4.6.1 Sistema de Iluminação

Relativamente ao sistema de iluminação, verificou-se que as imagens adquiridas apresentavam no seu centro uma mancha escura. Observando a Figura 4.40 a), obtida em testes efetuados em laboratório, não é evidente a presença desta mancha. Contudo, recorrendo a algoritmos de segmentação de imagem, esta torna-se bastante evidente, como é possível observar na Figura 4.40 b).

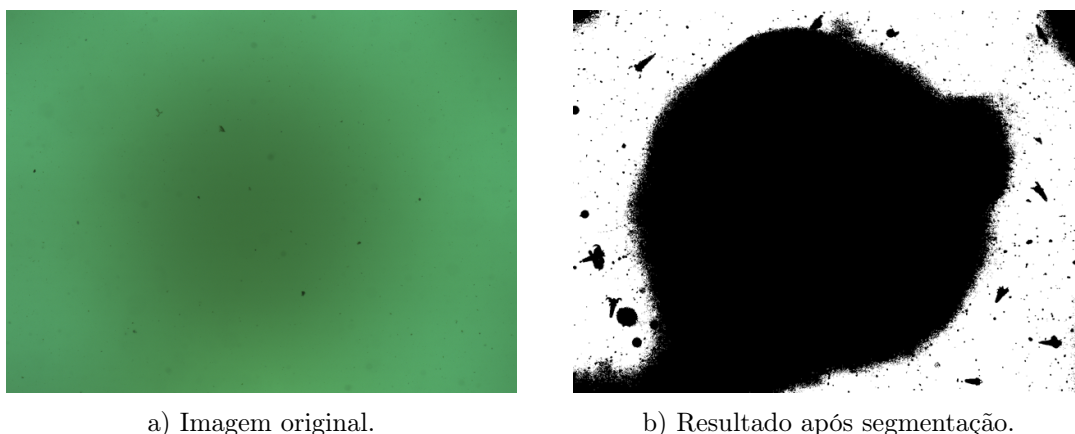


Figura 4.40: Representação da irregularidade na iluminação causada pela placa de iluminação.

Assim, de forma a colmatar esta falha, desenvolveu-se uma nova PCB para o sistema de iluminação com o mesmo número de LEDs, porém com uma distribuição diferente. Na Figura 4.41 é possível observar a dimensão da PCB de iluminação em relação à dimensão interna do cilindro de iluminação e as visões superior e inferior da PCB gerada pelo *software* KiCad.

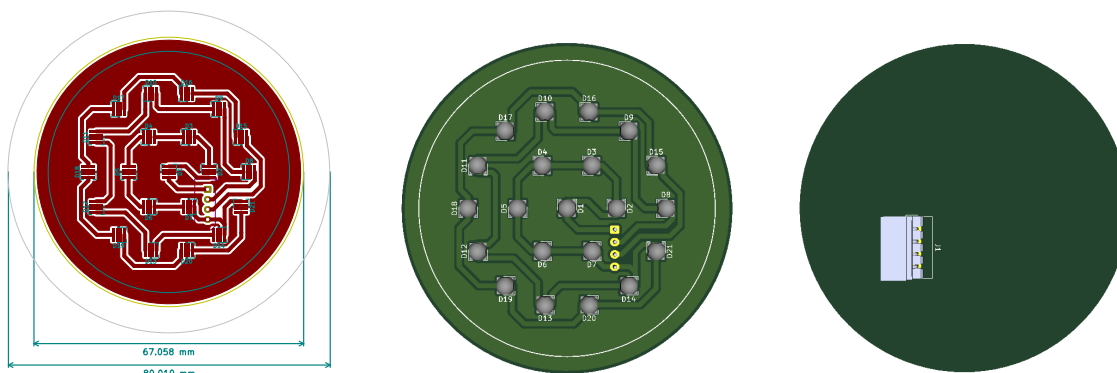


Figura 4.41: Dimensões e ilustração 3D da nova PCB de iluminação.

Na Figura 4.30 é possível observar o resultado final da PCB do sistema de iluminação após fabricação e a montagem de todos os componentes.

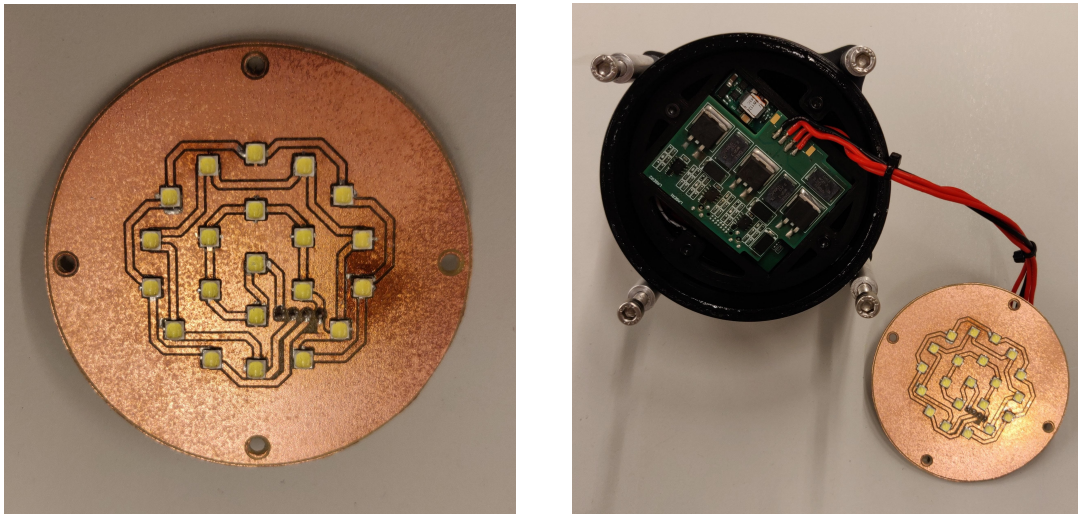


Figura 4.42: Composição do sistema de iluminação com a nova placa de iluminação.

Observando a Figura 4.43, obtida em laboratório com a utilização da nova placa do sistema de iluminação, é possível constatar que houve uma melhoria significativa na imagem quando aplicado um algoritmo de segmentação de imagem.

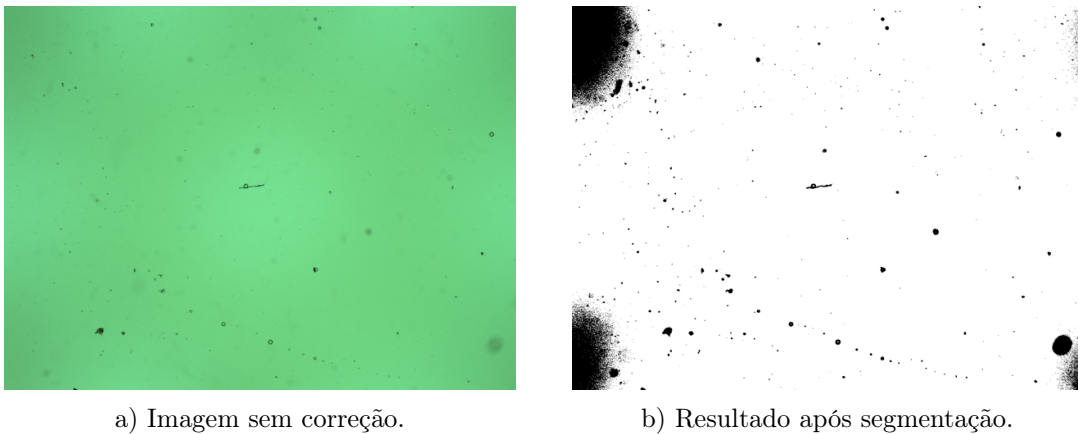


Figura 4.43: Representação da correção da irregularidade na iluminação causada pela placa de iluminação.

4.6.2 Sistema Ótico

Após a realização de vários testes, quer em ambiente laboratorial quer em cenário real, verificou-se que, apesar de a identificação dos organismos ser possível, as imagens adquiridas possuíam um detalhe reduzido. Desta forma, decidiu-se realizar um teste de resolução com a utilização do alvo de teste USAF 1951⁷.

Assim, desenvolveu-se um *kit*, representado na Figura 4.44, composto pelo alvo de teste USAF 1951 [116], impresso numa folha de acetato a uma resolução de 600 dpi.

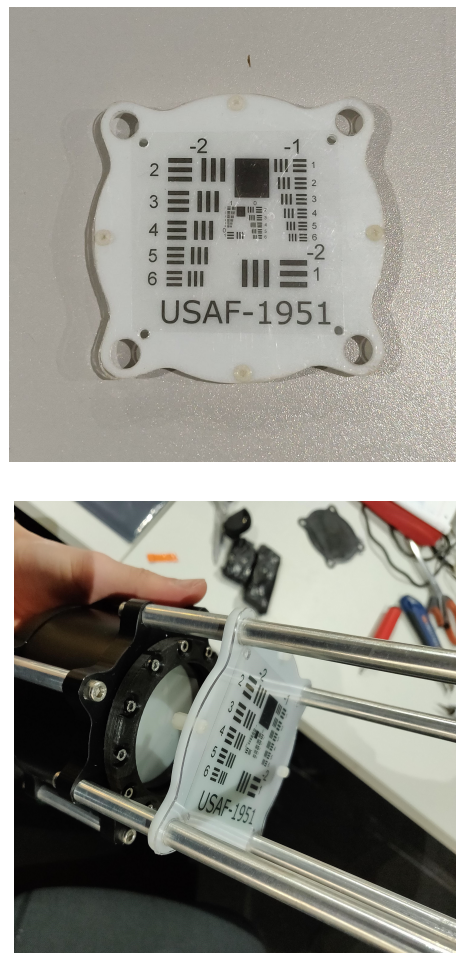
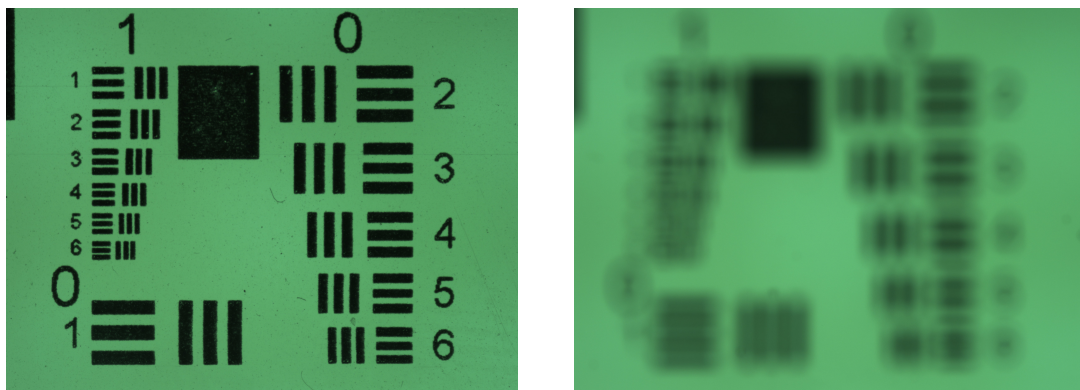


Figura 4.44: *Kit* do alvo de teste USAF 1951 desenvolvido.

De acordo com a informação apresentada na Tabela 3.2, a distância de trabalho da lente DTCM230-36 é de 110 mm, o que se pode comprovar na Figura 4.45.

⁷O USAF 1951 é um teste de resolução normalmente utilizado para a análise e validação de sistemas óticos, como, por exemplo, sistemas microscópicos. Este é constituído por linhas organizadas em grupos e elementos, sendo cada grupo composto por 6 elementos e cada elemento por 3 linhas horizontais e 3 linhas verticais, igualmente espaçadas. Uma vez que é necessária uma determinada resolução para distinguir as linhas de um determinado elemento de cada grupo, é possível estimar a resolução de um sistema a partir do maior elemento cujas linhas não sejam possíveis distinguir [22].



a) Fora de água com uma distância entre o USAF e a lente ótica de 110 mm.

b) Dentro de água com uma distância entre o USAF e a lente ótica de 110 mm.

Figura 4.45: Resultados obtidos a uma distância entre o USAF e a lente ótica de 110 mm.

Observando a Figura 4.45 a) verifica-se que o alvo USAF fora de água aparece focado e com elevado detalhe, mas, assim que o sistema é submerso, este aparece desfocado e sem detalhe, tal como é possível observar na Figura 4.45 b).

Este efeito ótico é explicado pela teoria de *flat port* [117] que defende que, quando um sistema ótico se encontra submerso, as diferenças entre os índices de refração da luz no ar e na água introduzem distorções, em específico o aumento da distância focal da lente, que por sua vez faz com que a distância de trabalho aumente.

Durante o desenvolvimento da estrutura mecânica este efeito ótico foi considerado, tendo sido escolhida uma vara de suporte com um comprimento de 150 mm, assim como é possível observar no Apêndice C. Contudo, não se considerou o facto de que cada um dos dois vidros utilizados levam a uma redução de 4 mm da distância de 150 mm, como se encontra ilustrado na Figura 4.46.

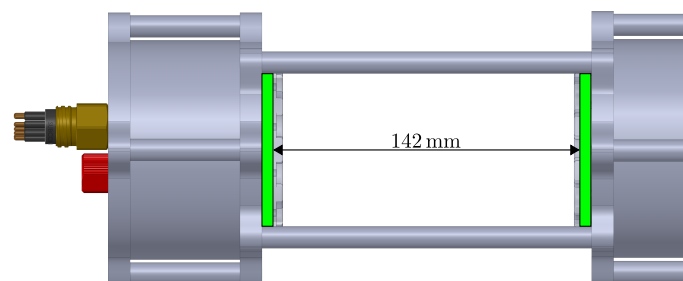


Figura 4.46: Representação da distância entre o sistema ótico e o sistema de iluminação.

Observando a Figura 4.46, pode concluir-se que o plano de focagem, localizado a 150 mm da lente ótica, coincide com o vidro do sistema de iluminação. Assim, foram maquinadas novas varas com um comprimento de 200 mm, garantindo um posicionamento mais adequado do plano de focagem. No Apêndice C é ilustrada a alteração realizada na vara de suporte com as medidas mais relevantes.

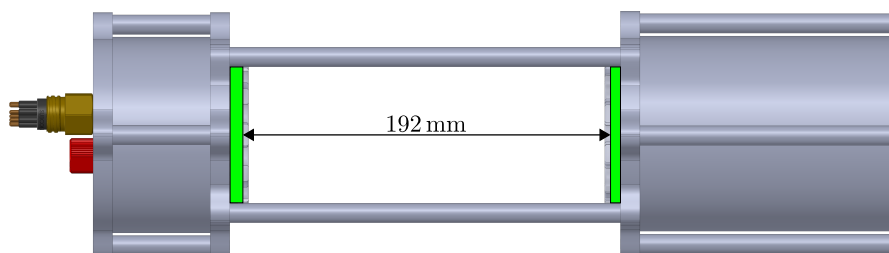
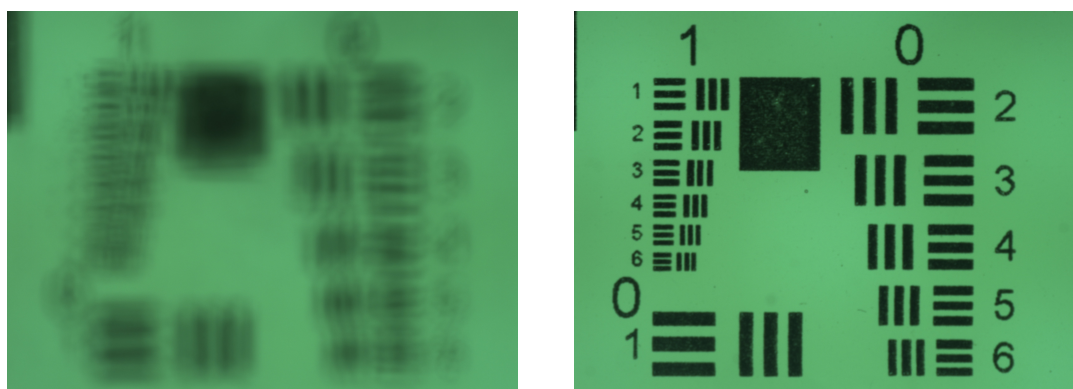


Figura 4.47: Representação da distância entre o sistema ótico e o sistema de iluminação após correção do comprimento das varas de suporte.

Desta forma, é possível observar na Figura 4.48 que o alvo USAF aparece focado e com elevado detalhe quando submerso e colocado à distância de trabalho de 150 mm.



a) Fora de água com uma distância entre o USAF e a lente ótica de 150 mm.

b) Dentro de água com uma distância entre o USAF e a lente ótica de 150 mm.

Figura 4.48: Resultados obtidos com uma distância entre o USAF e a lente ótica de 150 mm.

Uma vez que se realizou uma alteração na estrutura mecânica, novas simulações foram realizadas para as pressões de 10 bar e 100 bar, de forma a verificar se a estanqueidade do sistema se mantém. Os resultados obtidos estão descritos no Apêndice F. Analisando os dados obtidos é possível constatar que não se verificam alterações significativas provocadas pelas novas varas de suporte. Após a introdução das novas varas de suporte na estrutura, realizou-se um teste em laboratório onde se colocou o sistema num pequeno tanque com água salgada e adicionou-se uma pequena quantidade de artêmias. Na Figura 4.49 é possível observar uma imagem obtida através do sistema.

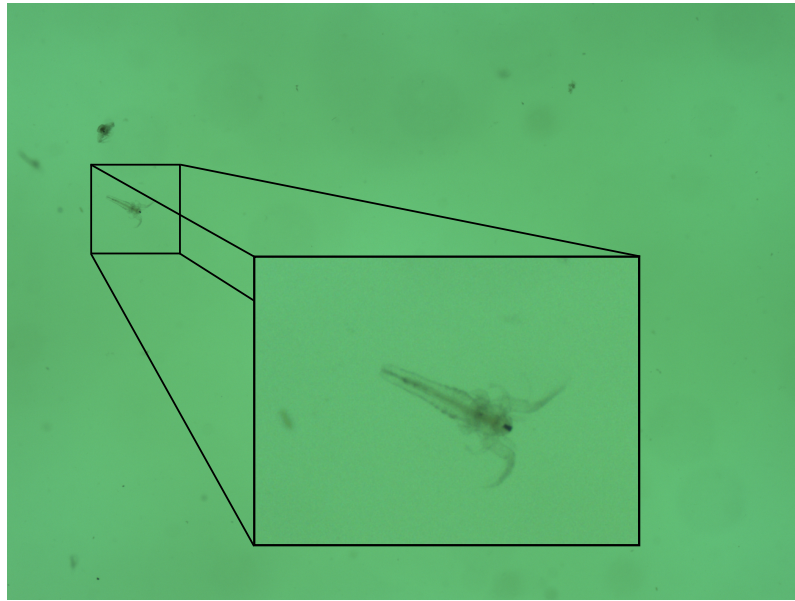


Figura 4.49: Resultado da captação de uma imagem em laboratório após a correção da vara de suporte.

Na Figura 4.50 é possível observar uma comparação entre os resultados obtidos antes e após a correção do comprimento da vara de suporte, onde é possível verificar as melhorias na qualidade de imagem que esta alteração proporcionou.

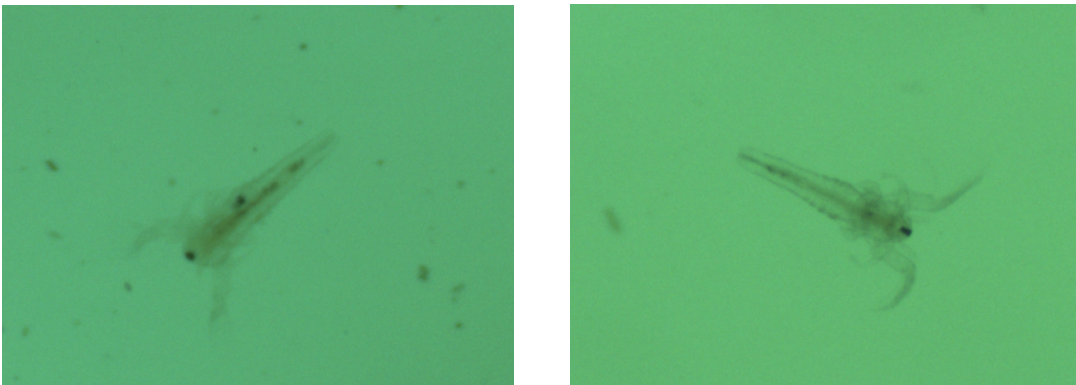


Figura 4.50: Comparação dos resultados obtidos antes, imagem da esquerda, e após, imagem da direita, a correção da distância de focagem.

De forma a avaliar o sistema em condições reais após a alteração à sua estrutura, foi realizada uma missão no rio Douro, perto de Avintes. Na Figura 4.51 é possível observar um dos diversos organismos capturados pelo sistema.

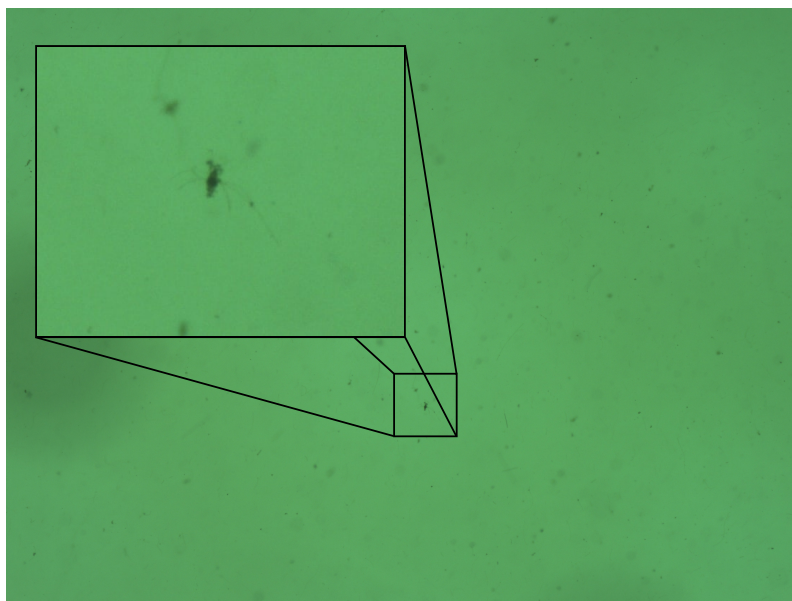


Figura 4.51: Resultado da captação de uma imagem em cenário real após a correção da vara de suporte.

4.6.3 Estrutura Mecânica

Tendo em consideração todos os resultados obtidos ao longo da implementação da estrutura mecânica apresentada na Secção 4.2, foram identificados os seguintes requisitos para o desenvolvimento de uma nova estrutura mecânica:

– **SBC:**

Uma vez que o cilindro apresentado em 4.2 foi projetado tendo em consideração as dimensões da Odroid Xu4, e que esta apresenta limitações em termos de processamento, decidiu-se projetar esta nova estrutura com o intuito de possibilitar a utilização das diferentes SBCs apresentadas em 3.4.4.

– **Iluminação:**

Relativamente ao sistema de iluminação, decidiu-se implementar, para além do sistema apresentado em 3.4.3, um sistema de iluminação em anel, tal como utilizado pelo CPICS, apresentado em 2.2.3.5. Assim, é permitido ao utilizador alterar entre os métodos de iluminação *bright field*, *back lighting* e *dark field*, *back lighting*.

– **Hardware adicional:**

Durante o decorrer da missão realizada em Esposende, verificou-se que a equipa do CIIMAR efetuava a recolha de determinados parâmetros da água antes de realizar a recolha de plâncton através do uso de redes. Desta forma, como *hardware* adicional decidiu-se integrar um sensor de temperatura e um sensor de profundidade. A escolha

da integração destes dois sensores deve-se ao facto de que ambos os parâmetros requerem a medição durante a recolha.

Decidiu-se também acrescentar ao sistema a capacidade de realizar a deteção e classificação de plâncton em tempo real através da utilização do *software* desenvolvido no LSA [118], que utiliza uma abordagem portátil de *deep learning* baseada em redes neuronais convolucionais. Desta forma, serão integradas duas *Movidius™ Neural Compute Stick* no sistema.

De acordo com os requisitos apresentados, esta nova estrutura mecânica apresentará alterações nas suas dimensões, tendo por base o conceito ilustrado na Figura 4.52. Desta forma, o sistema foi separado em três secções: a secção 1, composta pela câmara, lente ótica, unidade de armazenamento, SBC, BMS, baterias, SLSs, sensores e duas *Movidius™*; a secção 2, composta pelo sistema de iluminação *dark field, backlight*; e a secção 3, composta pelo sistema de iluminação *bright field, backlight*.

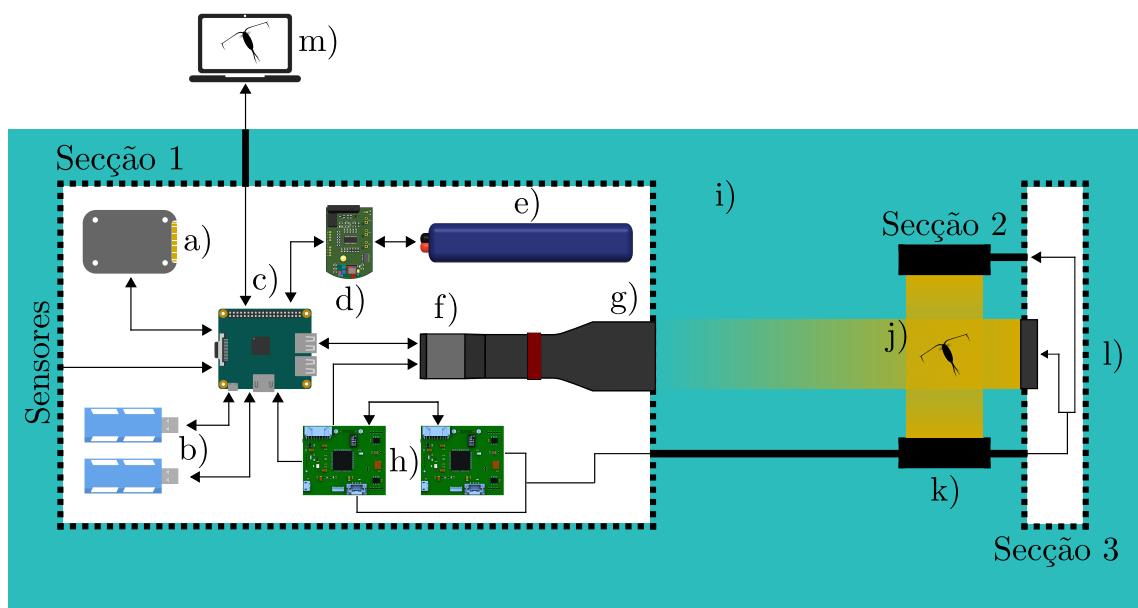


Figura 4.52: Esquema conceptual da nova estrutura mecânica.

- | | |
|----------------------|-------------------------------|
| a) Armazenamento; | h) Sistemas de iluminação; |
| b) <i>Movidius</i> ; | i) Coluna de água; |
| c) SBC; | j) Organismo em visualização; |
| d) BMS; | k) LEDs; |
| e) Bateria; | l) LEDs; |
| f) Câmara; | m) Ligação externa. |
| g) Lente ótica; | |

4.6.3.1 Estrutura Interna

Na Figura 4.53 é possível observar todas as peças desenvolvidas para cada componente utilizado da nova estrutura mecânica. No Apêndice E é ilustrado o desenho de cada peça com as medidas mais relevantes.

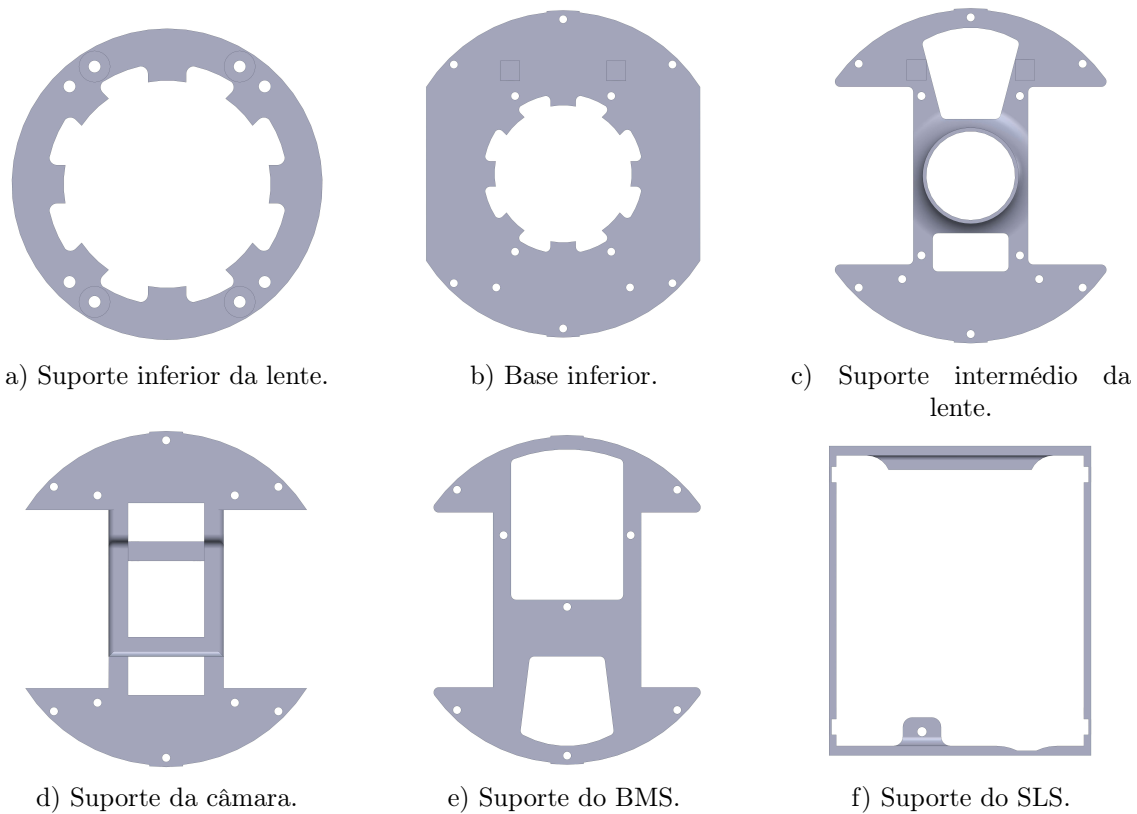


Figura 4.53: Peças de suporte interno da nova estrutura.

De forma a reforçar a estrutura interna, as peças serão unidas através do uso de espaçadores. Na Figura 4.54 é possível observar uma ilustração 3D da montagem final do novo suporte desenvolvido.

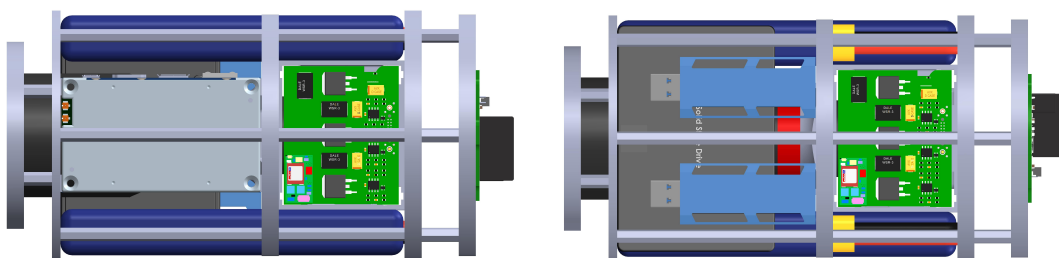


Figura 4.54: Esquema 3D da nova estrutura interna.

4.6.3.2 Estrutura Externa

Na Figura 4.55 é possível observar as peças desenvolvidas para a secção 1 da nova estrutura externa. No Apêndice E é ilustrado o desenho de cada peça com as medidas mais relevantes.

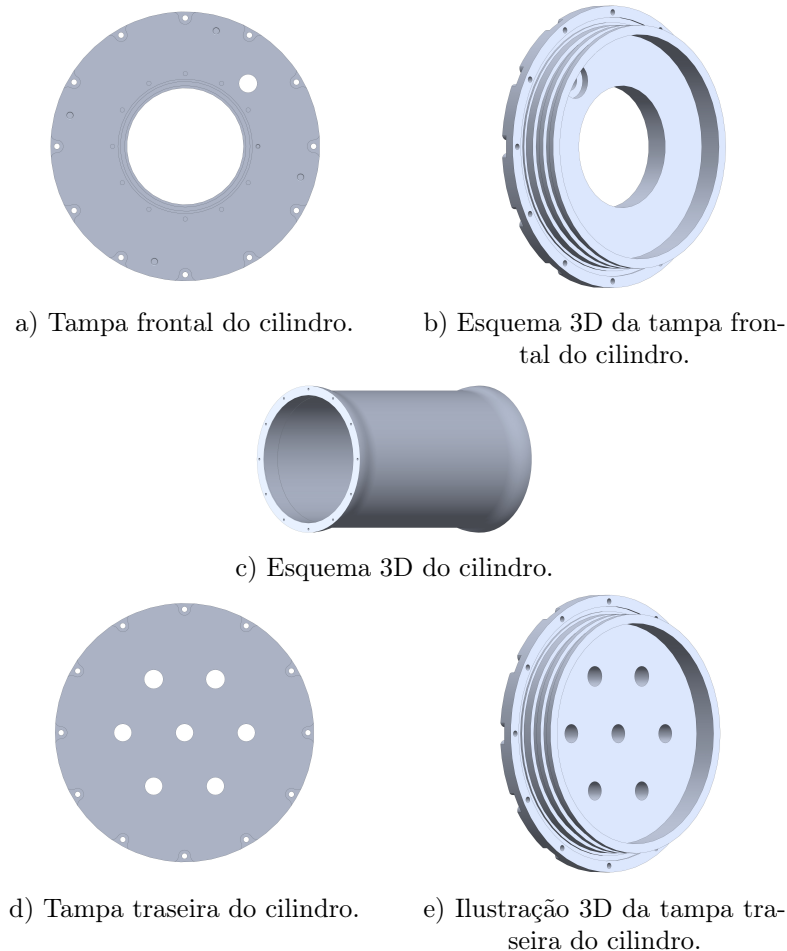


Figura 4.55: Esquema das peças da secção 1 da nova estrutura externa.

De modo a garantir a estanqueidade do sistema, é utilizado um sistema de proteção similar ao apresentado na Figura 4.4. Na Figura 4.56 é possível observar um esquema 3D do sistema de proteção desenvolvido para as tampas. Desta forma, a abertura para o vidro é protegida através do uso de uma peça 3D, representada por a), que comprime o vidro, representado por b), contra o o-ring colocado na ranhura, representada por c). Relativamente aos o-rings utilizados entre a tampa e o cilindro, é utilizado um o-ring de topo, representado por f), e dois o-rings laterais colocados nas ranhuras representadas por d), sendo estes utilizados tanto na tampa frontal como na tampa traseira. Ao contrário do sistema apresentado em 4.4, em vez de se utilizarem varas para prender as tampas ao cilindro, são utilizados parafusos que enroscam no cilindro, representado por e).

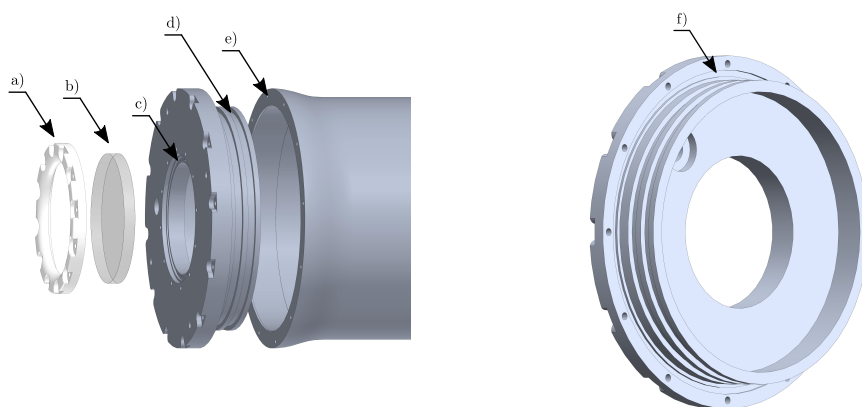


Figura 4.56: Esquema 3D do sistema de proteção da tampa frontal da nova estrutura mecânica.

Relativamente à tampa traseira, esta é composta por sete furações, como ilustrado na Figura 4.57. Desta forma é utilizada uma válvula de ar (a) para a selagem da estrutura e verificação de fugas, um sensor de pressão (b), um sensor de temperatura (c), um indicador RGB (d), um interruptor para ligar e desligar o sistema (e), e duas fichas subaquáticas para a comunicação externa (f) e alimentação (g).

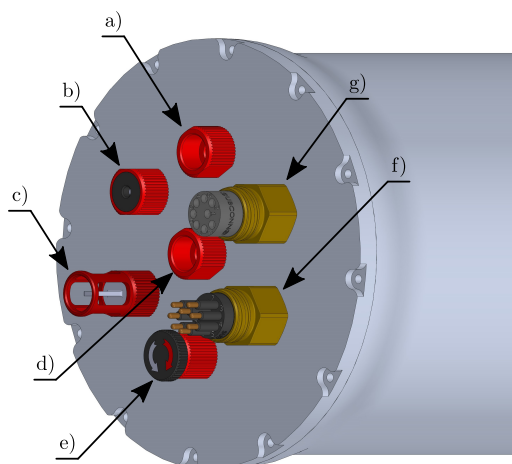


Figura 4.57: Esquema 3D da tampa traseira do cilindro.

No que diz respeito ao sistema de iluminação da secção 2, foi projetada uma estrutura em anel, ilustrada na Figura 4.58, onde os LEDs são dispostos de forma circular na ranhura central. No Apêndice E é ilustrado o desenho de cada peça com as medidas mais relevantes.

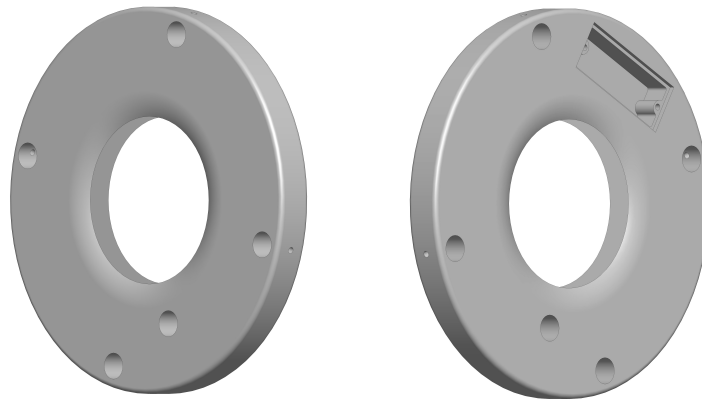


Figura 4.58: Esquema 3D do sistema de iluminação em anel.

Relativamente ao sistema de iluminação da secção 3, na Figura 4.59 é possível observar as peças desenvolvidas para esse propósito. No Apêndice E é ilustrado o desenho de cada peça com as medidas mais relevantes.

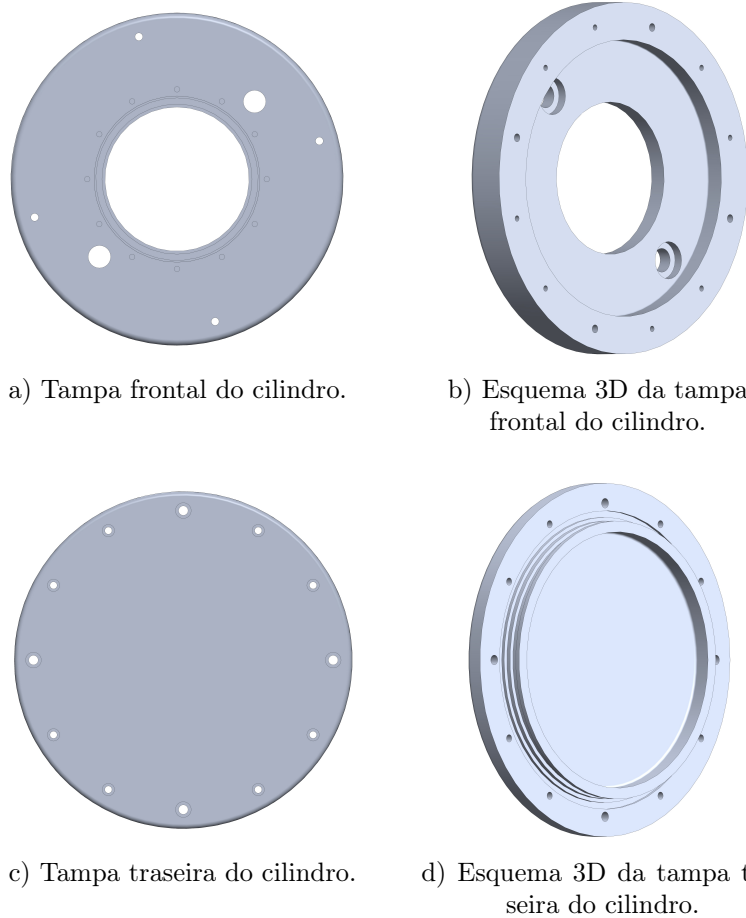


Figura 4.59: Esquema das peças da secção 3 da estrutura externa.

Na Figura 4.60 encontra-se uma ilustração 3D da montagem final da nova estrutura mecânica, onde é possível observar a estrutura interna e as secções 1, 2 e 3 da estrutura externa. Para o suporte das secções 2 e 3 do sistema são utilizadas varas de modo a formar uma única estrutura. No Apêndice E é ilustrado o desenho das varas com as medidas mais relevantes.

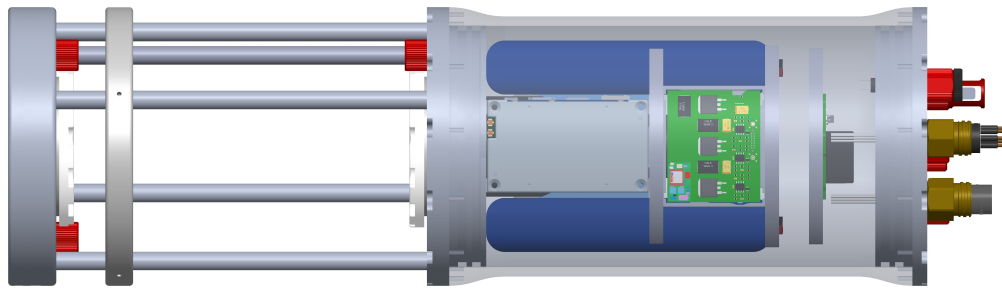


Figura 4.60: Esquema da nova estrutura mecânica.

Simulação - *Finite Element Method*

Uma vez desenhada a nova estrutura mecânica, efetuaram-se as simulações da mesma. Deste modo, foi necessário definir fixações e forças externas que interagem com o modelo mecânico, tal como ilustrado na Figura 4.61.

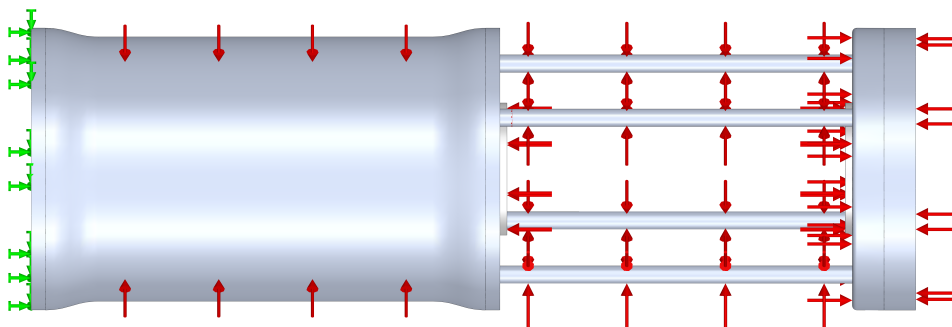


Figura 4.61: Interações definidas na simulação da nova estrutura mecânica.

- Forças de fixação;
- Forças externas (pressão).

Utilizaram-se as configurações presentes na Tabela 4.2 para a criação da *mesh*.

De modo a poder comparar esta nova estrutura mecânica com a estrutura anterior, foram realizadas simulações nas mesmas condições apresentadas em 4.2.3.

von Mises — 10 bar

Na Figura 4.62 é possível observar o resultado da simulação de *von Mises* na nova estrutura.

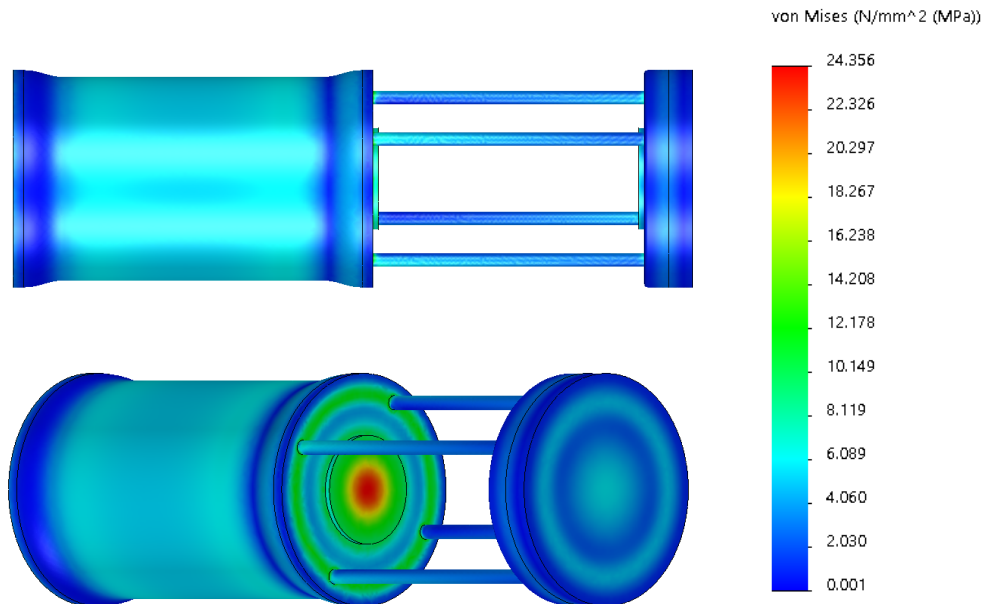


Figura 4.62: Resultado da simulação de *von Mises* da nova estrutura para uma pressão externa de 10 bar.

Após a análise do resultado da simulação, verifica-se que o valor máximo de pressão apresentado na escala de *von Mises*, 24.356 MPa, é atingido no vidro, tal como ilustrado na Figura 4.63.

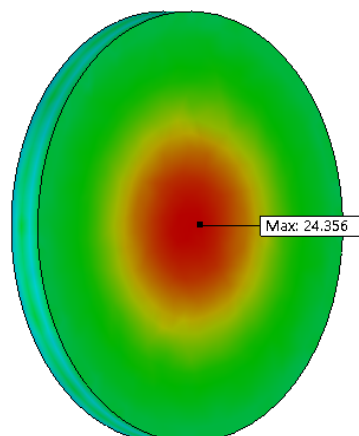


Figura 4.63: Valor máximo de pressão interna atingido na nova estrutura para uma pressão externa de 10 bar.

Displacement — 10 bar

Na Figura 4.64 é possível observar o resultado obtido da simulação de *displacement* na nova estrutura.

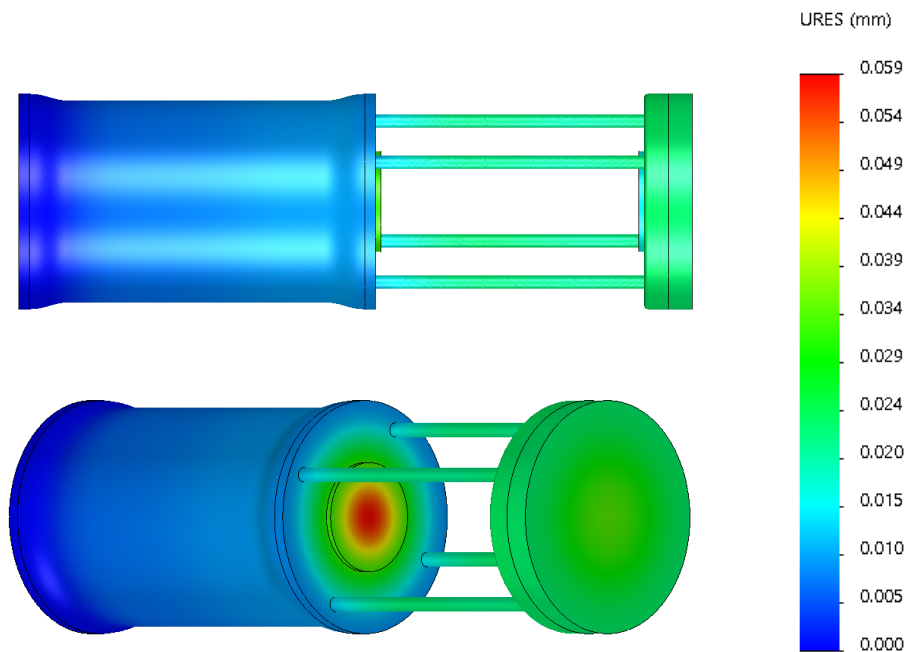


Figura 4.64: Resultado da simulação de *displacement* da nova estrutura para uma pressão externa de 10 bar.

Após a análise do resultado da simulação, verifica-se que o valor máximo de deformação apresentado na escala de URES, 59 μm , é atingido no vidro, ilustrado na Figura 4.65.

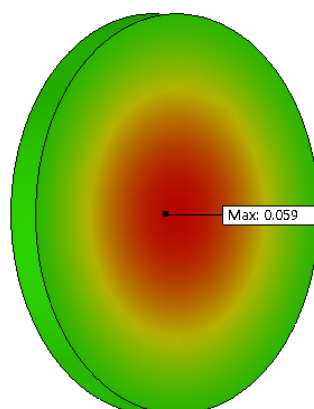


Figura 4.65: Valor máximo de deformação atingido na nova estrutura para uma pressão externa de 10 bar.

Conclusões — 10 bar

Uma vez que o valor máximo atingido na estrutura mecânica (24.356 MPa) é de uma magnitude bastante inferior ao *tensile strength* do vidro (280 MPa) e uma vez que o valor máximo da deformação atingido é de aproximadamente 59 μm , pode concluir-se que esta encontra-se corretamente dimensionada para uma pressão de 10 bar.

von Mises — 100 bar

Na Figura 4.66 é possível observar o resultado da simulação de *von Mises* na nova estrutura.

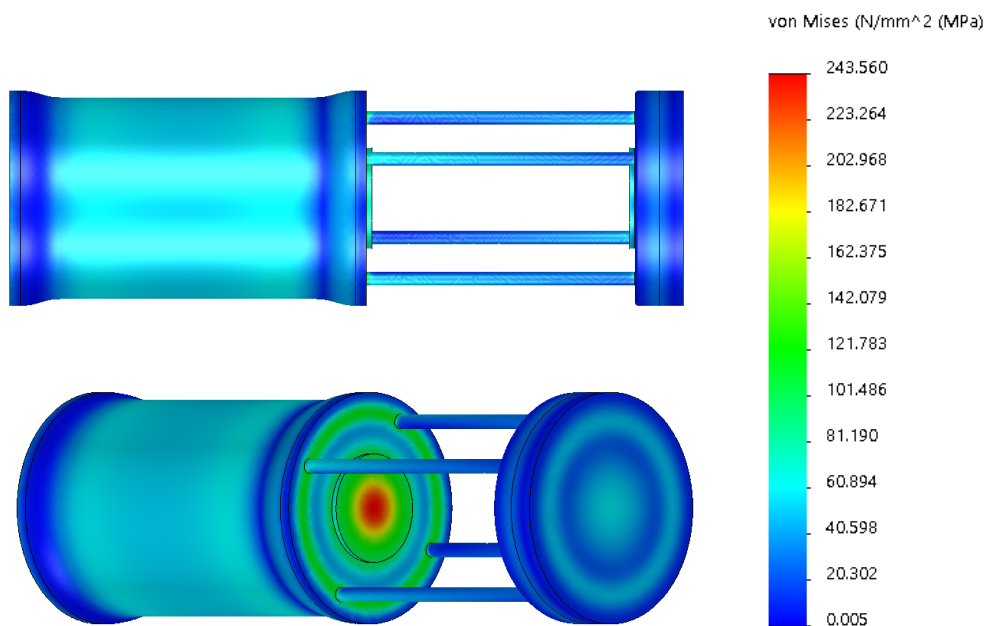


Figura 4.66: Resultado da simulação de von Mises da nova estrutura para uma pressão externa de 100 bar.

Após a análise do resultado da simulação, verifica-se que o valor máximo de pressão apresentado na escala de *von Mises*, 243.560 MPa, é atingido no vidro, tal como ilustrado na Figura 4.67.

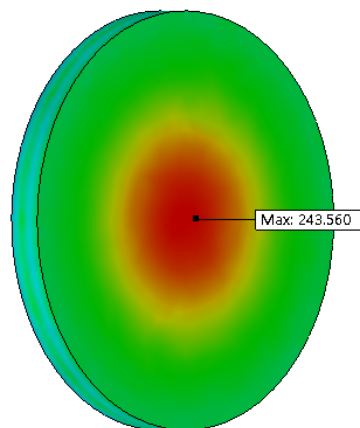


Figura 4.67: Valor máximo de pressão interna atingido na nova estrutura para uma pressão externa de 100 bar.

Displacement — 100 bar

Na Figura 4.68 é possível observar o resultado obtido da simulação de *displacement* na nova estrutura.

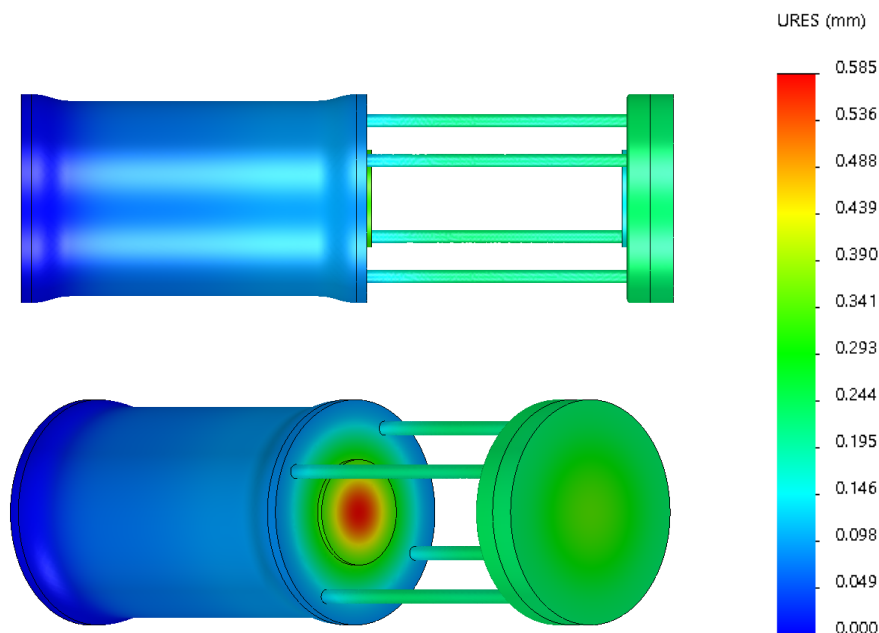


Figura 4.68: Resultado da simulação de *displacement* para uma pressão externa de 100 bar.

Após a análise do resultado da simulação, verifica-se que o valor máximo de deformação apresentado na escala de URES, 0.585 mm, é atingido no vidro, ilustrado na Figura 4.69.

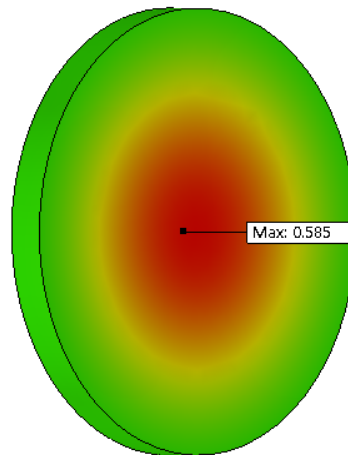


Figura 4.69: Valor máximo de deformação atingido na nova estrutura para uma pressão externa de 100 bar.

Conclusões — 100 bar

Uma vez que o valor máximo atingido na estrutura mecânica (243.560 MPa) é inferior ao *tensile strength* do vidro (280 MPa), e uma vez que o valor da deformação máximo atingido é de 0.585 mm, confirma-se que esta estrutura mecânica está corretamente dimensionada para uma pressão de 100 bar.

Comparando estes resultados com os resultados obtidos com a estrutura anterior, verifica-se que esta estrutura mecânica é capaz de operar à pressão de 100 bar, uma vez que o valor máximo da escala de *von Mises* é atingido no vidro, enquanto que na estrutura anterior o valor máximo da escala de *von Mises* é atingido no cilindro da secção 2, verificando-se que o fator limitante desta nova estrutura mecânica é o vidro.

**ESTA PÁGINA
FOI PROPOSITADAMENTE
DEIXADA EM BRANCO**

Capítulo 5

Conclusões e Trabalho Futuro

5.1 Conclusões

Este projeto de dissertação teve como principal objetivo o desenvolvimento de um protótipo de um sistema autónomo de aquisição de imagens de alta resolução de plâncton baseado numa configuração ótica e num sistema de iluminação que permitisse a captação de imagens de micro-organismos, para aplicações em ambiente subaquático.

Foram identificados os cenários de aplicação e foi feita uma análise dos principais métodos e sistemas de captação de plâncton existentes, de modo a perceber quais as vantagens e desvantagens que estes apresentam. Tendo em consideração os requisitos definidos, foi apresentada uma arquitetura e o projeto do sistema, onde os diferentes componentes foram selecionados.

Foi desenvolvido e implementado um protótipo funcional possuindo uma solução ótica com uma resolução de 18.10 Mpíxeis, um tamanho de píxel de 3.94 μm , um campo de visão de 19.37 mm \times 14.53 mm e uma densidade de píxel de 254 píxel/mm.

O sistema foi testado em condições laboratoriais, tendo sido eclodidas artémias salinas, o que veio a demonstrar a sua viabilidade para a captação de imagens de organismos de dimensões reduzidas.

Juntamente com investigadores do CIIMAR, foram analisadas 6228 imagens recolhidas pelo sistema em cenários reais, das quais 81 apresentavam diversos indivíduos. A análise em conjunto com estes investigadores permitiu comprovar que este sistema se adequa às necessidades de uma equipa científica, cujo objetivo passa pelo estudo e observação de plâncton.

Graças à avaliação dos resultados obtidos com o protótipo desenvolvido, foi possível identificar algumas melhorias a implementar. Desta forma realizou-se o desenho de uma nova estrutura mecânica que permitisse a utilização de sensores, nomeadamente sensor de temperatura e pressão, um novo método de iluminação em anel, a capacidade de atingir maior profundidade e, por último, o suporte para a utilização de outras SBCs com o intuito de futuramente integrar algoritmos de processamento de imagem.

Foram realizadas simulações com recurso ao *software* SolidWorks, tendo-se verificado que quer a primeira estrutura mecânica, quer a segunda, se adequam aos cenários de aplicação para os quais o sistema foi projetado. Especificamente, ambas as estruturas são capazes de suportar pressões até 100 bar, no entanto verificou-se que a segunda estrutura mecânica suporta pressões superiores em comparação à primeira, tendo sido concluído que o principal fator limitante da nova estrutura seria o vidro utilizado. Este poderá futuramente ser trocado por um vidro de outro material ou forma, como, por exemplo, um vidro côncavo. Lamentavelmente, a nova estrutura mecânica não foi maquinada devido aos impactos causados pela pandemia provocada pelo vírus SARS-CoV-2.

Em suma, pode-se concluir que os objetivos propostos no início desta dissertação foram cumpridos na sua totalidade.

5.2 Trabalho Futuro

A título de eventuais desenvolvimentos futuros por forma a melhorar este sistema, destacam-se os seguintes tópicos:

- Realização de testes intensivos em cenário real da primeira estrutura desenvolvida;
- Estudo e análise de alternativas ao vidro utilizado;
- Estudo e análise do sistema de iluminação em anel;
- Maquinação e realização de testes da nova estrutura mecânica;
- Integração de *software* de deteção e classificação em tempo real de plâncton;
- Integração de balanceamento ativo na placa de BMS;
- Realização de testes para a captação de imagens de microplástico.

Referências

- [1] M. Kennish, *Practical Handbook of Marine Science*, 3.^a ed. CSIRO Publishing, 2001.
- [2] I. Suthers, D. Rissik, e A. Richardson, *Plankton: A Guide to Their Ecology and Monitoring for Water Quality*, 2.^a ed. CSIRO Publishing, 2019.
- [3] National Geographic Society - Image by Dr. D. P. Wilson, “Assorted Plankton.” Disponível em: <https://www.nationalgeographic.org/encyclopedia/plankton/>. Acedido pela última vez a 29 de janeiro de 2020.
- [4] N. E. Observatory, “What are Phytoplankton?” Disponível em: <https://earthobservatory.nasa.gov/features/Phytoplankton>. Acedido pela última vez a 24 de junho de 2020.
- [5] P. James J. Pierson, “Plankton.” Disponível em: <http://www.planktoneer.com/plankton.html>. Acedido pela última vez a 24 de junho de 2020.
- [6] R. Sanders e S. Wickham, “Planktonic protozoa and metazoa: Predation, food quality and population control,” *Marine Microbial Food Webs*, vol. 7, pp. 197–223, jan. 1993.
- [7] S. Gajbhiye, “Zooplankton - Study methods, importance and significant observations,” jan. 2002.
- [8] A. Hobday, T. Okey, E. Poloczanska, T. Kunz, e A. Richardson, “Impacts of climate change on Australian marine life,” *Report to the Australian Greenhouse Office*, out. 2006.
- [9] B. Karlson e R. Lopes, “Observational approaches to community structure, from microbes to zooplankton,” 01 2009.
- [10] V. Hidalgo-Ruz, L. Gutow, R. Thompson, e M. Thiel, “Microplastics in the marine environment: A review of the methods used for identification and quantification,” *Environmental science & technology*, vol. 46, pp. 3060–75, 03 2012.
- [11] M. Eriksen, L. Lebreton, H. Carson, M. Thiel, C. Moore, J. Borerro, F. Galgani, P. Ryan, e J. Reisser, “Plastic pollution in the world’s oceans: More than 5 trillion plastic pieces weighing over 250,000 tons afloat at sea,” *PLoS ONE*, vol. 9, 12 2014.
- [12] V. Lin, “Research highlights: Impacts of microplastics on plankton,” *Environ. Sci.: Processes Impacts*, vol. 18, 02 2016.
- [13] INESC TEC, “Centro de Robótica e Sistemas Autónomos,” 2019. Disponível em: <https://www.inesctec.pt/pt/centros/cras>. Acedido pela última vez a 23 de outubro de 2019.

- [14] A. Martins *et al.*, “Marineye — a tool for marine monitoring,” 04 2016, pp. 1–7.
- [15] CIIMAR, “Marineye - A prototype for multitrophic oceanic monitoring.” Disponível em: <http://marineye.ciimar.up.pt/>. Acedido pela última vez a 23 de outubro de 2019.
- [16] INESCTEC, “CORAL project presents deep sea challenges in Portugal.” Disponível em: <https://www.inesctec.pt/en/news/coral-project-presents-deep-seachallenges-in-portugal>. Acedido pela última vez a 23 de outubro de 2019.
- [17] CIIMAR, “Spilless - First line response to oil spills based on native microorganisms cooperation.” Disponível em: <http://spilless.ciimar.up.pt/>. Acedido pela última vez a 23 de outubro de 2019.
- [18] D. A. Forsyth e J. Ponce, *Computer Vision: A Modern Approach*. Prentice Hall Professional Technical Reference, 2002.
- [19] N. Waltham, “CCD and CMOS sensors,” *ISSI Scientific Reports Series*, vol. 9, pp. 391–408, Jan 2010.
- [20] C. Johnson, *Spectroscopy and Dynamics of Single Molecules: Methods and Applications*. Elsevier, 2019.
- [21] G. Holst, *CCD Arrays, Cameras, and Displays*. JCD Publishing, 1998.
- [22] Edmund Optics, “A technical resource for imaging solutions,” *IMAGING OPTICS*, n.º V183E, 2018. Disponível em: <https://www.edmundoptics.com/resources/industry-expertise/imaging-optics/imaging-resource-guide/>.
- [23] Jonen, “A photo of a eurocopter ec-120.” abril 2017. Disponível em: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Jamtlands_Flyg_EC120B_Colibri.JPG. Acedido pela última vez a 24 de maio de 2020.
- [24] Instituto Superior de Engenharia do Porto, “Documentos públicos,” maio. Disponível em: <https://www.isep.ipp.pt/ISEP/DocPub>. Acedido pela última vez a 24 de maio de 2020.
- [25] H. Fotospots, “Hamburger fotospots cheatcard,” abril 2016. Disponível em: <http://blog.hamburger-fotospots.de>.
- [26] Opto Engineering, “Basics,” 2017. Disponível em: https://www.optoengineering.cn/media/downloads/docs/Basics_Opto-Engineering_2017_EN.pdf.
- [27] D. D. Sameoto, L. O. Jaroszynski, e W. B. Fraser, “A multiple opening and closing plankton sampler based on the mocness and n.i.o. nets,” *Journal of the Fisheries Research Board of Canada*, vol. 34, pp. 1230–1235, 04 2011.
- [28] L. R. Haury, P. H. Wiebe, e S. H. Boyd, “Longhurst-hardy plankton recorders: their design and use to minimize bias,” *Deep Sea Research and Oceanographic Abstracts*, vol. 23, n.º 12, pp. 1217 – 1229, 1976.

- [29] L. Hernroth, “Sampling and filtration efficiency of two commonly used plankton nets. A comparative study of the Nansen net and the Unesco WP 2 net,” *Journal of Plankton Research*, vol. 9, n.º 4, pp. 719–728, 07 1987.
- [30] M. S. Schmid, C. Aubry, J. Grigor, e L. Fortier, “The loki underwater imaging system and an automatic identification model for the detection of zooplankton taxa in the arctic ocean,” *Methods in Oceanography*, vol. 15-16, pp. 129 – 160, 2016, computer Vision in Oceanography.
- [31] J. Schulz, K. Barz, D. Mengedoht, T. Hanken, H. Lilienthal, N. Rieper, J. Hoops, K. Vogel, e H. Hirche, “Lightframe on-sight key species investigation (loki),” em *OCEANS 2009-EUROPE*, May 2009, pp. 1–5.
- [32] M. Schmid, C. Aubry, J. Grigor, e L. Fortier, “ZOOMIE v 1.0 (Zooplankton Multiple Image Exclusion),” 05 2015.
- [33] J. Schulz, K. Barz, P. Ayon, A. Lüdtke, O. Zielinski, D. Mengedoht, e H.-J. Hirche, “Imaging of plankton specimens with the lightframe on-sight keyspecies investigation (loki) system,” *Journal of the European Optical Society - Rapid publications*, vol. 5, n.º 0, 2010.
- [34] D. Kocak e F. Caimi, “The current art of underwater imaging - with a glimpse of the past and vision of the future,” *Marine Technology Society Journal*, vol. 39, pp. 5–26, 09 2005.
- [35] M. C. Benfield, P. Grosjean, P. Culverhouse, X. Irigoien, M. Sieracki, A. Lopez-Urrutia, H. Dam, Q. Hu, C. S. Davis, A. Hanson, C. Pilskaln, E. M. Riseman, H. Schultz, P. E. Utgoff, e G. Gorsky, “Rapid: Research on automated plankton identification,” *Oceanography (Washington D.C.)*, vol. 20, pp. 12–26, 06 2007.
- [36] C. S. Davis, F. T. Thwaites, S. M. Gallager, e Q. Hu, “A three-axis fast-tow digital video plankton recorder for rapid surveys of plankton taxa and hydrography,” *Limnology and Oceanography: Methods*, vol. 3, n.º 2, pp. 59–74, 2005.
- [37] H. Bi, S. Cook, H. Yu, M. C. Benfield, e E. D. Houde, “Deployment of an imaging system to investigate fine-scale spatial distribution of early life stages of the ctenophore *Mnemiopsis leidyi* in Chesapeake Bay,” *Journal of Plankton Research*, vol. 35, n.º 2, pp. 270–280, 12 2012.
- [38] H. Bi, Z. Guo, M. C Benfield, C. Fan, M. Ford, S. Shahrestani, e J. M Sieracki, “A semi-automated image analysis procedure for in situ plankton imaging systems,” *PLoS ONE*, vol. 10, 05 2015.
- [39] S. Marini, L. Corgnati, L. Mazzei, E. Ottaviano, B. Isoppo, S. Aliani, A. Conversi, e A. Griffa, “Guard1: An autonomous system for gelatinous zooplankton image-based recognition,” em *OCEANS 2015 - Genova*, May 2015, pp. 1–7.
- [40] L. Corgnati, S. Marini, L. Mazzei, E. Ottaviani, S. Aliani, A. Conversi, e A. Griffa, “Looking inside the ocean: Toward an autonomous imaging system for monitoring gelatinous zooplankton,” *Sensors*, vol. 16, n.º 12, 2016.
- [41] CHDK, “Canon hack development kit.” Disponível em: <https://chdk.fandom.com/wiki/CHDK>. Acedido pela última vez a 1 de março de 2019.

- [42] L. Corgnati, L. Mazzei, S. Marini, S. Aliani, A. Conversi, A. Griffa, B. Isoppo, e E. Ottaviani, “Automated gelatinous zooplankton acquisition and recognition,” em *2014 ICPR Workshop on Computer Vision for Analysis of Underwater Imagery*, 8 2014, pp. 1–8.
- [43] Scripps Institution of Oceanography, “Scripps plankton camera system.” Disponível em: <http://spc.ucsd.edu/>. Acedido pela última vez a 09 de dezembro de 2019.
- [44] Jaffe Laboratory for Underwater Imaging, “Automated classification.” Disponível em: <http://jaffeweb.ucsd.edu/research-projects/scripps-plankton-camera-system/automated-classification/>. Acedido pela última vez a 09 de dezembro de 2019.
- [45] Scripps Institution of Oceanography, “Spview (plankton camera image browser).” Disponível em: <http://spc.ucsd.edu/imagdata/spcview-plankton-camera-image-browser/>. Acedido pela última vez a 09 de dezembro de 2019.
- [46] Scott M. Gallagher, inventor, Woods Hole Oceanographic Institute (WHOI), assignee, “Continuous particle imaging and classification system,” United States patent US20170293217A1, Oct 2017.
- [47] “Oceancube-100,” http://www.coastaloceanvision.com/wp-content/cutsheets/Cut-Sheet_OceanCube-Observatory_20180210.pdf, accessed: 2018-10-19.
- [48] “Coastal ocean vision,” <http://www.coastaloceanvision.com/images/>, accessed: 2018-10-19.
- [49] “Roi-class,” http://www.coastaloceanvision.com/wp-content/cutsheets/Cut-Sheet_ROI-Class_Software_20180210.pdf, accessed: 2018-10-19.
- [50] “Roi-manage,” http://www.coastaloceanvision.com/wp-content/cutsheets/Cut-Sheet_ROI-Manage_Software_20180210.pdf, accessed: 2018-10-19.
- [51] M. Picheral, L. Guidi, L. Stemann, D. M. Karl, G. R. Id Daoud, e G. Gorsky, “The underwater vision profiler 5: An advanced instrument for high spatial resolution studies of particle size spectra and zooplankton,” *Limnology and Oceanography: Methods*, vol. 8, pp. 462–473, 09 2010.
- [52] G. Gorsky, M. D. Ohman, M. Picheral, S. Gasparini, L. Stemann, J.-B. Romagnan, A. Cawood, S. Pesant, C. García-Comas, e F. Prejger, “Digital zooplankton image analysis using the ZooScan integrated system,” *Journal of Plankton Research*, vol. 32, n.º 3, pp. 285–303, 03 2010.
- [53] S. Gasparini e E. Antajan, “Plankton identifier,” 10 2013. Disponível em: http://www.obs-vlfr.fr/~gaspari/Plankton_Identifier/index.php.
- [54] L. Breiman, “Random forests,” *Machine Learning*, vol. 45, n.º 1, pp. 5–32, 10 2001.
- [55] R. K. Cowen e C. M. Guigand, “In situ ichthyoplankton imaging system (isiis): system design and preliminary results,” *Limnology and Oceanography: Methods*, vol. 6, n.º 2, pp. 126–132, 2008.
- [56] R. K. Cowen, C. M. Guigand, C. Cousin, G. Tsechpenakis, S. P. Chatzis, e A. T. Greer, “An operational in situ ichthyoplankton imaging system (isiis),” 2009.

- [57] S. Samson, T. Hopkins, A. Remsen, L. Langebrake, T. Sutton, e J. Patten, “A system for high-resolution zooplankton imaging,” *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, vol. 26, n.º 4, pp. 671–676, 10 2001.
- [58] G. Griffiths, *Technology and applications of autonomous underwater vehicles*. CRC Press, 2002, vol. 2.
- [59] S. Feflatyev, K. Kramer, L. . Hall, D. Goldgof, R. Kasturi, A. Remsen, e K. Daly, “Detection of anomalous particles from deepwater horizon oil spill using sipper 3 underwater imaging platform,” 2014.
- [60] J. Watson, A. Salucci, G. Craig, D. Hendry, P. Hobson, R. Lampitt, J. Marteau, H. Nareid, M. Player, K. Saw, e K. Tipping, “Simultaneous in-line and off-axis subsea holographic recording of plankton and other marine particles,” *Measurement Science and Technology*, vol. 12, p. L9, 07 2001.
- [61] E. Malkiel, O. Alquaddoomi, e J. Katz, “Measurements of plankton distribution in the ocean using submersible holography,” *Measurement Science and Technology*, vol. 10, n.º 12, pp. 1142–1152, 11 1999.
- [62] J. Katz, P. Donaghay, J. Zhang, S. King, e K. Russell, “Submersible holocamera for detection of particle characteristics and motions in the ocean,” *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*, vol. 46, n.º 8, pp. 1455 – 1481, 1999.
- [63] J. Watson, M. A. Player, H. Y. Sun, D. C. Hendry, e H. P. Dong, “eholocam - an electronic holographic camera for subsea analysis,” em *Oceans '04 MTS/IEEE Techno-Ocean '04 (IEEE Cat. No.04CH37600)*, vol. 3, 11 2004, pp. 1248–1254 Vol.3.
- [64] H. Sun, D. Hendry, M. Player, e J. Watson, “In situ underwater electronic holographic camera for studies of plankton,” *Oceanic Engineering, IEEE Journal of*, vol. 32, pp. 373 – 382, 05 2007.
- [65] H. Sun, P. W Benzie, N. Burns, D. Hendry, M. Player, e J. Watson, “Underwater digital holography for studies of marine plankton,” *Philosophical transactions. Series A, Mathematical, physical, and engineering sciences*, vol. 366, pp. 1789–806, 06 2008.
- [66] D. W. Pfitsch, E. Malkiel, Y. Ronzhes, S. R. King, J. Sheng, e J. Katz, “Development of a free-drifting submersible digital holographic imaging system,” em *Proceedings of OCEANS 2005 MTS/IEEE*, 9 2005, pp. 690–696 Vol. 1.
- [67] D. W. Pfitsch, E. Malkiel, M. Takagi, Y. Ronzhes, S. King, J. Sheng, e J. Katz, “Analysis of in-situ microscopic organism behavior in data acquired using a free-drifting submersible holographic imaging system,” *OCEANS 2007*, pp. 1–8, 2007.
- [68] E. Malkiel, J. Sheng, J. Katz, e J. R. Strickler, “The three-dimensional flow field generated by a feeding calanoid copepod measured using digital holography,” *The Journal of experimental biology*, vol. 206, pp. 3657–66, 11 2003.
- [69] J. Milgram e W. Li, “Computational reconstruction of images from holograms,” *Applied optics*, vol. 41, pp. 853–64, 03 2002.
- [70] A. B. Bochdansky, M. H. Jericho, e G. J. Herndl, “Development and deployment of a point-source digital inline holographic microscope for the study of plankton and

- particles to a depth of 6000 m,” *Limnology and Oceanography: Methods*, vol. 11, n.º 1, pp. 28–40, 2013.
- [71] G. W. Graham e W. Nimmo-Smith, “The application of holography to the analysis of size and settling velocity of suspended cohesive sediments,” *Limnology and Oceanography: Methods*, vol. 8, pp. 1–15, 01 2010.
- [72] A. Morel e S. Maritorena, “Bio-optical properties of oceanic waters: A reappraisal,” *Journal of Geophysical Research*, vol. 106, pp. 7163–7180, 04 2001.
- [73] V. Agostini, A. Macedo, e E. Muxagata, “O papel do biofilme bacteriano no aco-
plamento bentopelágico, durante o processo de bioincrustação,” *Revista Liberato*,
vol. 19, pp. 23–41, 06 2018.
- [74] R. Piola, B. Salters, C. Grandison, M. Ciacic, e R. Hietbrink, “Assessing the use
of low voltage uv-light emitting miniature leds for marine biofouling control,” De-
fence Science and Technology Group Fishermans Bend Victoria Australia, Relatório
técnico, 2016.
- [75] Scripps Institution of Oceanography, “New wipers installed.” Disponível em:
<http://spc.ucsd.edu/2019/02/27/new-wipers-installed/>. Acedido pela última vez a
09 de dezembro de 2019.
- [76] X. Tang, W. Kenneth Stewart, H. Huang, S. Gallager, C. S. Davis, L. Vincent, e
M. Marra, “Automatic plankton image recognition,” *Artif. Intell. Rev.*, vol. 12, pp.
177–199, 02 1998.
- [77] C. S. Davis, S. M. Gallager, M. Marra, e W. K. Stewart, “Rapid visualization of
plankton abundance and taxonomic composition using the video plankton recorder,”
Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography, vol. 43, n.º 7, pp. 1947
– 1970, 1996.
- [78] A. Yamaguchi, Y. Watanabe, H. Ishida, T. Harimoto, K. Furusawa, S. Suzuki, J. Ishi-
zaka, T. Ikeda, e M. M. Takahashi], “Structure and size distribution of plankton
communities down to the greater depths in the western north pacific ocean,” *Deep
Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, vol. 49, n.º 24, pp. 5513 –
5529, 2002, north Pacific Biogeochemical Processes.
- [79] E. Silva, A. Martins, J. M. Almeida, H. Ferreira, A. Valente, M. Camilo, A. Fi-
gueiredo, e C. Pinheiro, “TURTLE - a robotic autonomous deep sea lander,” em
OCEANS 2016 MTS/IEEE Monterey, set. 2016, pp. 1–5.
- [80] GEOMAR, “Ocean Circulation and Climate Dynamics,” abr. 2015. Disponível
em: <https://www.geomar.de/en/research/fb1/fb1-po/observing-systems/mooring/>.
Acedido pela última vez a 29 de janeiro de 2020.
- [81] W. H. Oceanographic, “Oceanic Microbial Genomics Platform,” abr. 2010. Dis-
ponível em: <https://www.whoi.edu/GBF-OOI/page.do?pid=41505&tid=441&cid=106513&ct=61&article=71774>. Acedido pela última vez a 29 de janeiro de 2020.
- [82] M. Quigley, K. Conley, B. Gerkey, J. Faust, T. Foote, J. Leibs, R. Wheeler, e A. Ng,
“Ros: an open-source robot operating system,” vol. 3, 01 2009.

- [83] IDS Imaging, “UI-3590CP-C-HQ Rev.2,” 2019. Disponível em: <https://en.ids-imaging.com/store/products/cameras/ui-3590cp-rev-2.html>. Acedido pela última vez a 29 de novembro de 2019.
- [84] IDS Imaging, “U3-3800CP-C-HQ Rev.2,” 2019. Disponível em: <https://en.ids-imaging.com/store/products/cameras/u3-3800cp.html>. Acedido pela última vez a 29 de novembro de 2019.
- [85] FLIR Systems, “BFS-U3-123S6C-C,” 2019. Disponível em: <https://www.flir.com/products/blackfly-s-usb3/?model=BFS-U3-123S6C-C>. Acedido pela última vez a 29 de novembro de 2019.
- [86] FLIR Systems, “BFS-U3-200S6C-C,” 2019. Disponível em: <https://www.flir.com/products/blackfly-s-usb3/?model=BFS-U3-200S6C-C>. Acedido pela última vez a 29 de novembro de 2019.
- [87] Edmund Optics, “0.151X, 1/1.8" C-Mount TitanTL™ Telecentric Lens,” 2019. Disponível em: <https://www.edmundoptics.com/p/0151x-118-c-mount-titantrade-telecentric-lens/3431/>. Acedido pela última vez a 29 de novembro de 2019.
- [88] Edmund Optics, “0.16X SilverTL™ Telecentric Lens,” 2019. Disponível em: <https://www.edmundoptics.com/p/016x-silvertl-telecentric-lens/13647/>. Acedido pela última vez a 29 de novembro de 2019.
- [89] Edmund Optics, “0.184X, 2/3" C-Mount TitanTL™ Telecentric Lens,” 2019. Disponível em: <https://www.edmundoptics.com/p/0184x-23-c-mount-titantrade-telecentric-lens/3435/>. Acedido pela última vez a 29 de novembro de 2019.
- [90] INFAIMON, “DTCM230-36,” 2019. Disponível em: <https://www.infaimon.com/pt-pt/producto/dtcm/>. Acedido pela última vez a 29 de novembro de 2019.
- [91] Edmund Optics, “0.25X - 0.5X VariMagTL™ Telecentric Lens,” 2019. Disponível em: <https://www.edmundoptics.com/p/025x-05x-varimagtl-telecentric-lens/30641/>. Acedido pela última vez a 29 de novembro de 2019.
- [92] HARDKERNEL, “ODROID-XU4,” 2019. Disponível em: <https://www.hardkernel.com/shop/odroid-xu4-special-price/>. Acedido pela última vez a 17 de maio de 2020.
- [93] UP-Board, “UP Core Series,” 2019. Disponível em: <https://up-board.org/upcore/specifications/>. Acedido pela última vez a 17 de maio de 2020.
- [94] NVIDIA, “Jetson TX2 Module,” 2020. Disponível em: <https://developer.nvidia.com/embedded/jetson-tx2>. Acedido pela última vez a 17 de maio de 2020.
- [95] NVIDIA, “Harness AI at the Edge with the Jetson TX2 Developer Kit,” 2020. Disponível em: <https://developer.nvidia.com/embedded/jetson-tx2-developer-kit>. Acedido pela última vez a 18 de maio de 2020.
- [96] Connect Tech Inc., “Astro Carrier for NVIDIA® Jetson™ TX2/TX2i/TX1,” 2020. Disponível em: <http://connecttech.com/product/astro-carrier-for-nvidia-jetson-tx2-tx1/>. Acedido pela última vez a 18 de maio de 2020.

- [97] Anqi Xu and contributors, “ueye_cam - ROS Wiki,” 2017. Disponível em: http://wiki.ros.org/ueye_cam. Acedido pela última vez a 17 de maio de 2020.
- [98] D. Fryer e J. Harvey, *High Pressure Vessels*. Springer US, 2012.
- [99] L. Martins, “Anodização e coloração de peças de alumínio,” Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Relatório técnico, 2002.
- [100] Poly Lanema, “Liga de alumínio AW 6063,” 2020. Disponível em: https://www.polylanema.pt/client/files/0000000001/aw6063-fichatecnica_1491.pdf. Acedido pela última vez a 22 de maio de 2020.
- [101] DeepSea Power & Light, “Under Pressure™ Design Software,” 2020. Disponível em: <https://www.deepsea.com/knowledgebase/design-tools/under-pressure-design-software/>. Acedido pela última vez a 22 de maio de 2020.
- [102] ASM Aerospace Specification Metals Inc., “ASM Material Data Sheet: Aluminum 6063-T6,” 2020. Disponível em: <http://asm.matweb.com/search/SpecificMaterial.asp?bassnum=MA6063T6>. Acedido pela última vez a 22 de maio de 2020.
- [103] P. H. Corp., Ed., *Parker O-Ring Handbook ORD 5700*. Parker Hannifin Corp., 2018.
- [104] M. Lopes, *Introduction to Glass Science and Technology*. The Royal Society of Chemistry, 2005.
- [105] P. Kurowski, *Engineering Analysis with SOLIDWORKS Simulation 2019*. SDC Publications, 2019.
- [106] CLIFTON STEEL, “Tensile STRENGTH vs Yield Strength,” 2020. Disponível em: <https://www.cliftonsteel.com/knowledge-center/tensile-and-yield-strength>. Acedido pela última vez a 27 de maio de 2020.
- [107] Linear Technology Corporation, “LTC6803-2/LTC6803-4 - Multicell Battery Stack Monitor,” 2012. Disponível em: <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/680324fa.pdf>. Acedido pela última vez a 12 de maio de 2020.
- [108] Linear Technology Corporation, “LTC2955 - Pushbutton On/Off Controller with Automatic Turn-On,” 2012. Disponível em: <https://docs-emea.rs-online.com/webdocs/1329/0900766b81329f93.pdf>. Acedido pela última vez a 12 de maio de 2020.
- [109] Murata Power Solutions, Inc., “OKI-T/36W-W40 Series | Datasheet ,” 2020. Disponível em: <https://power.murata.com/data/power/oki-t36-w40.pdf>. Acedido pela última vez a 12 de maio de 2020.
- [110] RECOM Power, “DC/DC Converter R-78E-0.5,” 2019. Disponível em: https://pt.mouser.com/datasheet/2/468/R-78Exx-0.5-940995.pdf?fbclid=IwAR3kSO4WLS1LhJ4t27vV5pPJP4q7dtByTJq_kGIPLmC2cv-7eLJX8v6Qz4. Acedido pela última vez a 12 de maio de 2020.

- [111] Data brief - NUCLEO-F303k8 - STM32 Nucleo-32 boards, “STMICROELECTRONICS,” 2019. Disponível em: https://www.st.com/resource/en/data_brief/nucleo-f303k8.pdf. Acedido pela última vez a 12 de maio de 2020.
- [112] Texas Instruments, Inc., “TXS0102 2-Bit Bidirectional Voltage-Level Translator,” 2020. Disponível em: <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/txs0102.pdf>. Acedido pela última vez a 12 de maio de 2020.
- [113] CREE, “Cree XLamp XP-L LED Data Sheet,” 2018. Disponível em: <https://www.cree.com/led-components/media/documents/ds-XPL.pdf>. Acedido pela última vez a 21 de maio de 2020.
- [114] J. Piper, “Artemia: A model specimen for educational microscopy projects in biological and ecological fields,” *Microscopy Today*, vol. 26, n.º 4, p. 12–19, 2018.
- [115] A. Puello-Cruz, B. González-Rodríguez, A. García-Ortega, e S. Gomez, *Use of the tropical harpacticoid copepod Tisbe monozota Bowman, 1962 (Copepoda: Harpacticoida: Tisbidae) as live food in marine larviculture*, 01 2004, vol. 3.
- [116] Utilizador da Wikipédia: Setreset, “USAF-1951 map, calibrated. Licença: CC BY-SA 3.0.” 2013. Disponível em: <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:USAF-1951.svg>. Acedido pela última vez a 27 de maio de 2020.
- [117] M. Edge, *The Underwater Photographer: Digital and Traditional Techniques*. Focal, 2006.
- [118] P. Geraldès, J. Barbosa, A. Martins, A. Dias, C. Magalhães, S. Ramos, e E. Silva, “In situ real-time zooplankton detection and classification,” em *OCEANS 2019 - Marseille*, June 2019, pp. 1–6.

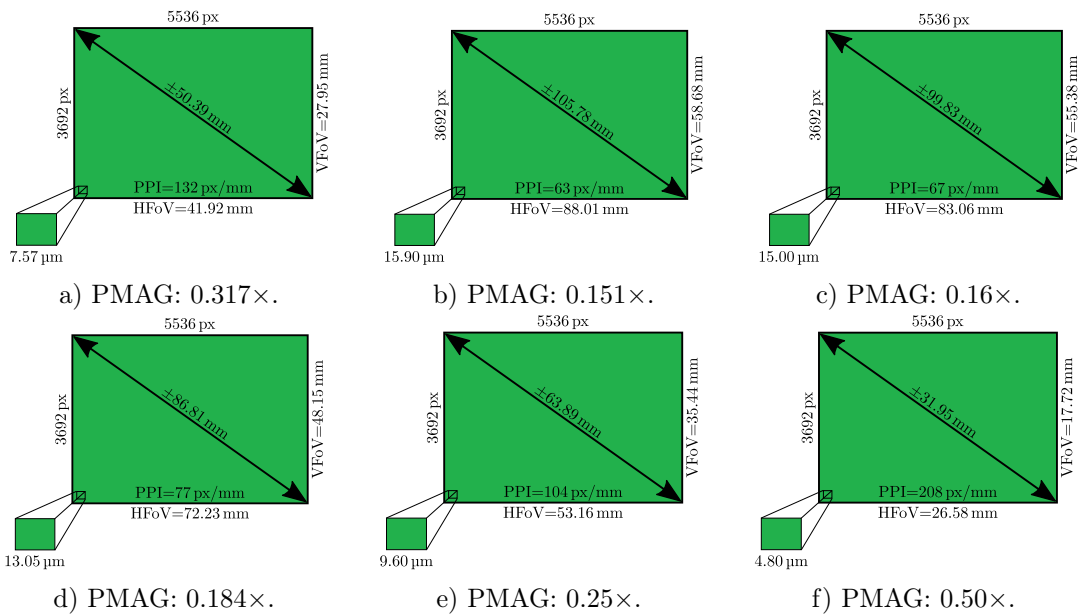
**ESTA PÁGINA
FOI PROPOSITADAMENTE
DEIXADA EM BRANCO**

Apêndice A

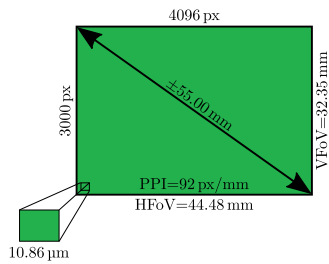
Estudo dos Componentes

De forma a complementar a informação presente no Subcapítulo 3.4.2, foram realizados cálculos teóricos, utilizando as Equações 3.1, 3.2, 3.3 e 3.4, de forma a prever o comportamento ótico das restantes câmaras recolhidas, presentes na Tabela 3.1, quando utilizadas com as diversas lentes, presentes na Tabela 3.2.

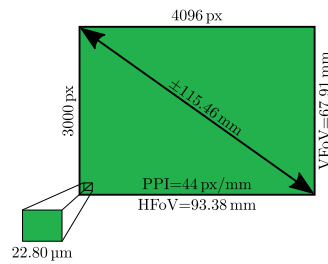
U3-3800



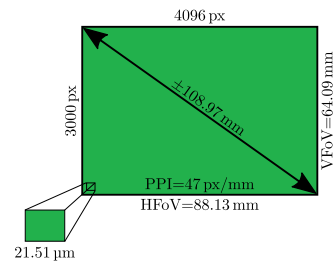
BFS-U3-123S6C



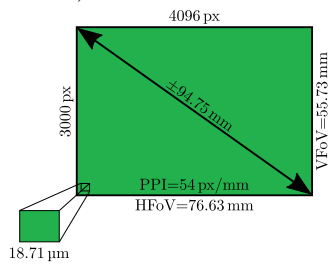
a) PMAG: 0.317×



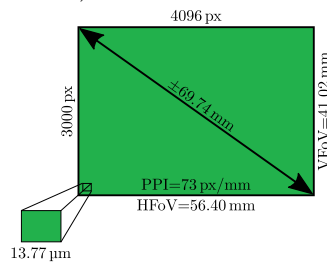
b) PMAG: 0.151×



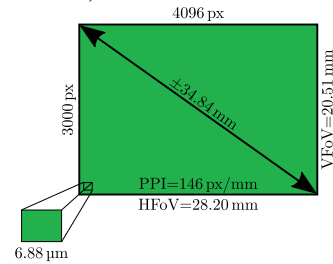
c) PMAG: 0.16×



d) PMAG: 0.184×

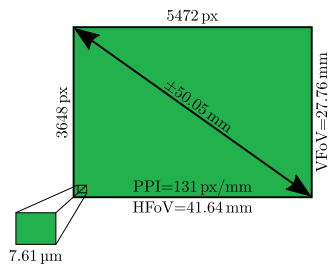


e) PMAG: 0.25×

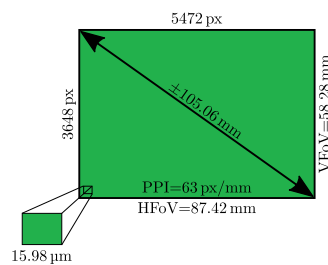


f) PMAG: 0.50×

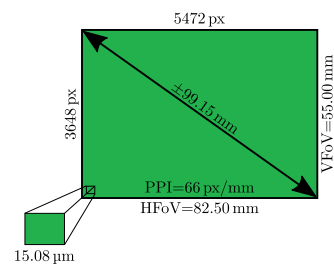
BFS-U3-200S6C



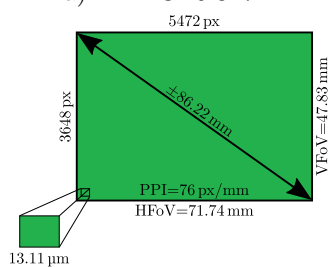
a) PMAG: 0.317×



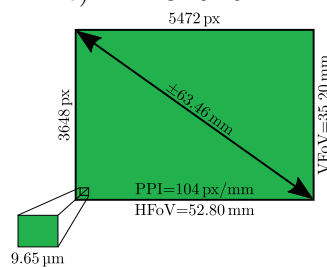
b) PMAG: 0.151×



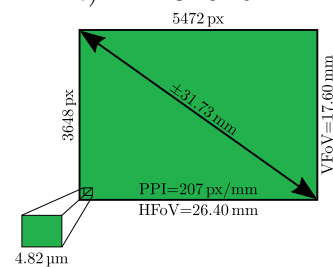
c) PMAG: 0.16×



d) PMAG: 0.184×



e) PMAG: 0.25×



f) PMAG: 0.50×

Apêndice B

Under PressureTM Design - Relatório de Simulação

Under Pressure Ver. 4.6 01:22:44 05-22-2020 Page 1 of 2

TUBE CONFIGURATION (External Pressure)

Inner Diameter : 90.000 mm
Outer Diameter : 100.00 mm
Wall Thickness : 5.0000 mm
Tube Length : 500.00 mm

Weight in air : 2.0653 kg
Weight in water: -1.9609 kg

Failure Mode: Shell failure at 234.75 Bar (Thick wall eq's)

Thin Wall Buckling at 255.36 Bar by 2 nodes
Seat failure N/A
Shear failure N/A

Test Aluminum Properties:

Yield Strength : 214 MPa
Elastic Modulus : 68900 MPa
Density : 0.1 lb/cu in
Poisson's Ratio : 0.33
Comments :
Under Pressure test for Aluminum 6063-T6.

Tube distortion values:

Pressure Bar	Depth m (sea)	Max Axial Stress, Bar	Max Hoop Stress, Bar	Max Equiv Stress, Bar	d ID mm
100.00	993.48	-526.32	-1052.6	911.61	-0.11481
200.00	1982.6	-1052.6	-2105.3	1823.2	-0.22962
234.75*	2325.3	-1235.5	-2471.1	2140.0	-0.26952
300.00*	2967.5	-1578.9	-3157.9	2734.8	-0.34444
400.00*	3948.1	-2105.3	-4210.5	3646.4	-0.45925
500.00*	4924.6	-2631.6	-5263.2	4558.0	-0.57406
600.00*	5896.9	-3157.9	-6315.8	5469.6	-0.68887
700.00*	6865.2	-3684.2	-7368.4	6381.2	-0.80368
800.00*	7829.4	-4210.5	-8421.1	7292.8	-0.91849
900.00*	8789.7	-4736.8	-9473.7	8204.5	-1.0333
1000.0*	9746.1	-5263.2	-10526	9116.1	-1.1481
1100.0*	10699	-5789.5	-11579	10028	-1.2629
1200.0*	11647	-6315.8	-12632	10939	-1.3777
1300.0*	12592	-6842.1	-13684	11851	-1.4926
1400.0*	13533	-7368.4	-14737	12762	-1.6074
1500.0*	14471	-7894.7	-15789	13674	-1.7222
1600.0*	15405	-8421.1	-16842	14586	-1.8370
1700.0*	16335	-8947.4	-17895	15497	-1.9518
1800.0*	17261	-9473.7	-18947	16409	-2.0666
1900.0*	18185	-10000	-20000	17321	-2.1814
2000.0*	19104	-10526	-21053	18232	-2.2962

* = after housing failure

Under Pressure Ver. 4.6 01:22:54 05-22-2020 Page 2 of 2

Tube distortion values:

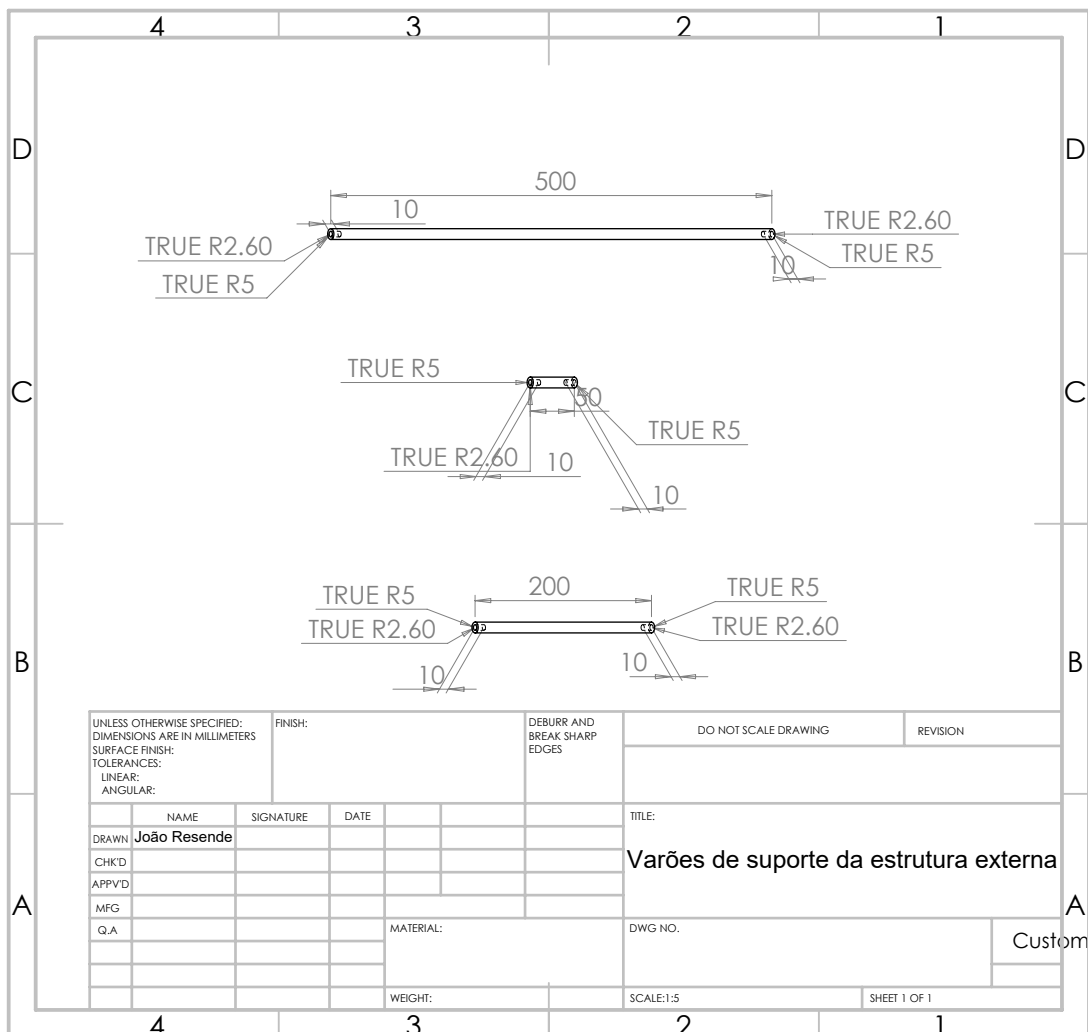
d OD mm	d Length mm
-0.10827	-0.12986
-0.21653	-0.25972
-0.25415	-0.30485
-0.32480	-0.38958
-0.43306	-0.51944
-0.54133	-0.64930
-0.64959	-0.77916
-0.75786	-0.90902
-0.86612	-1.0389
-0.97439	-1.1687
-1.0827	-1.2986
-1.1909	-1.4285
-1.2992	-1.5583
-1.4074	-1.6882
-1.5157	-1.8180
-1.6240	-1.9479
-1.7322	-2.0778
-1.8405	-2.2076
-1.9488	-2.3375
-2.0570	-2.4673
-2.1653	-2.5972

* = after housing failure

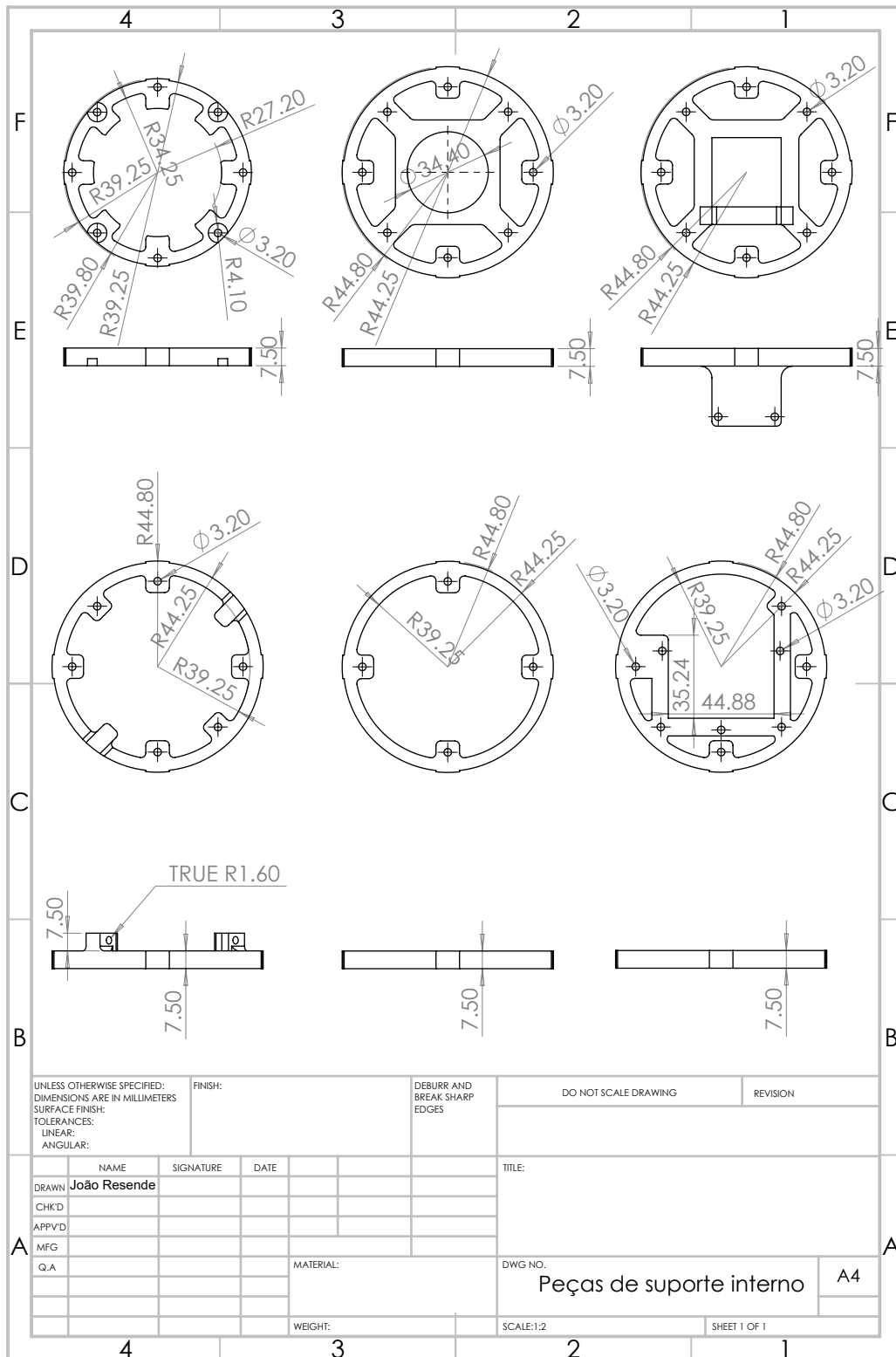
Apêndice C

Desenhos da Estrutura Mecânica

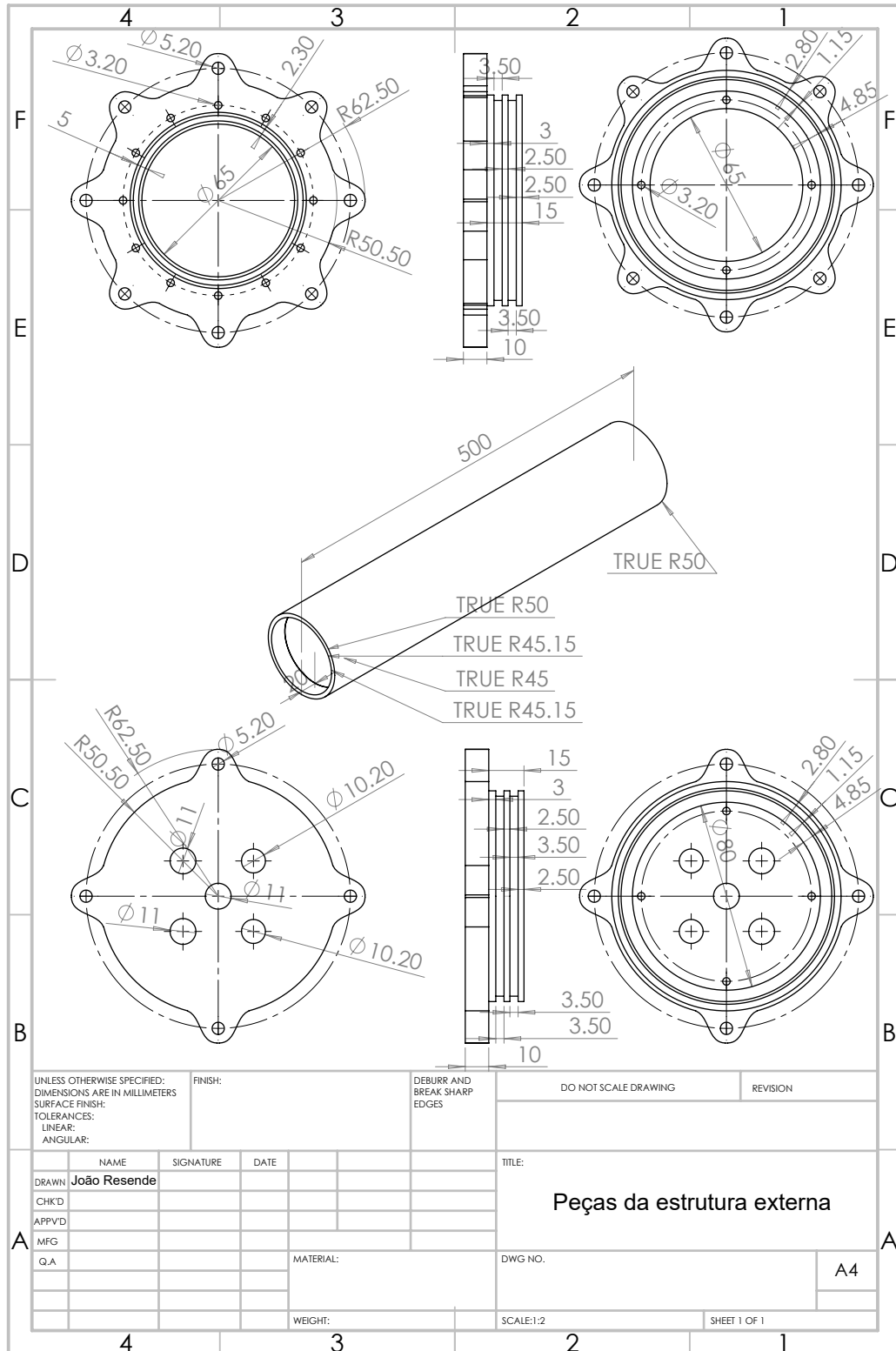
Peças estrutura externa - Varões de Suporte



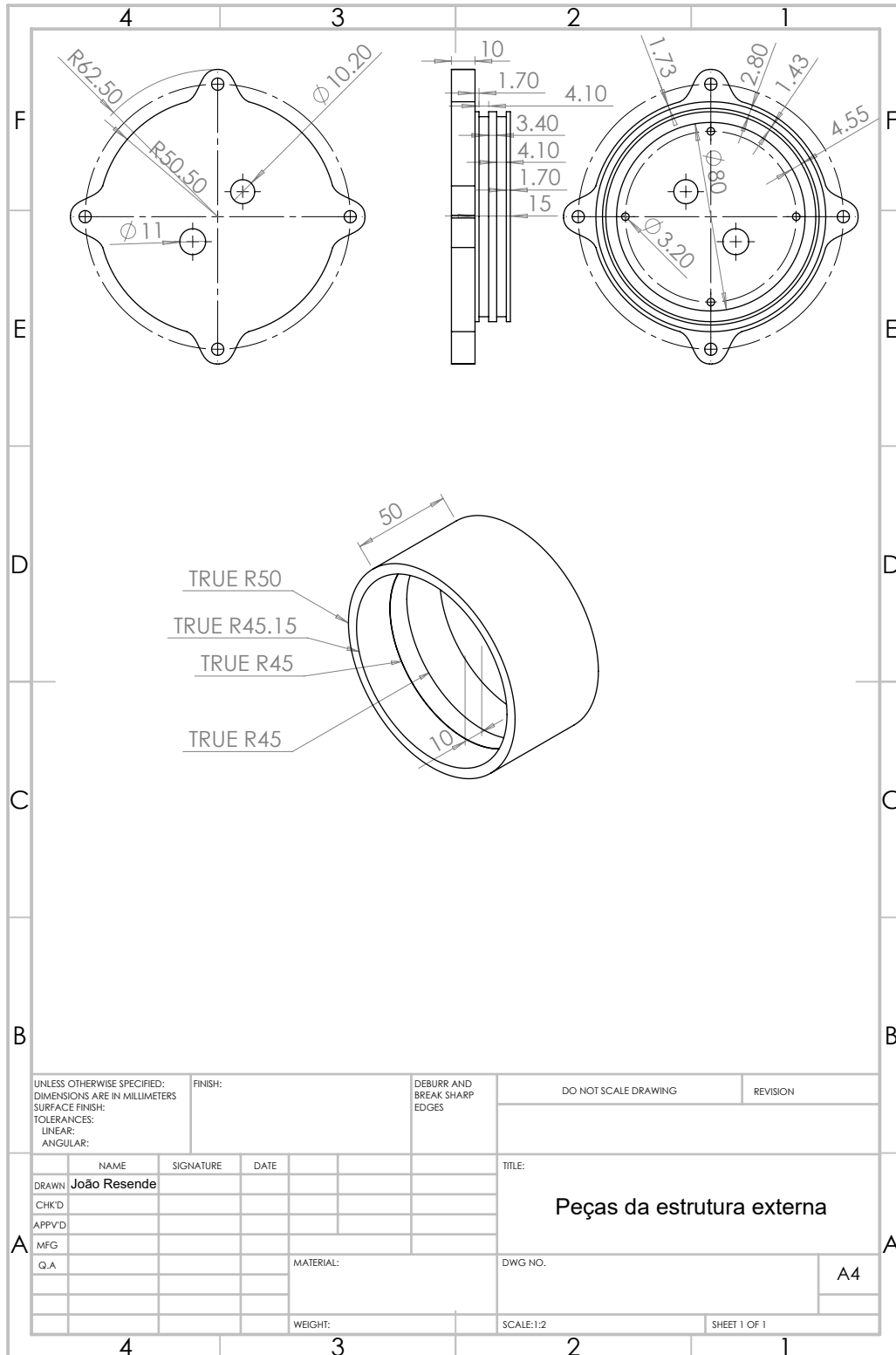
Peças de suporte interno



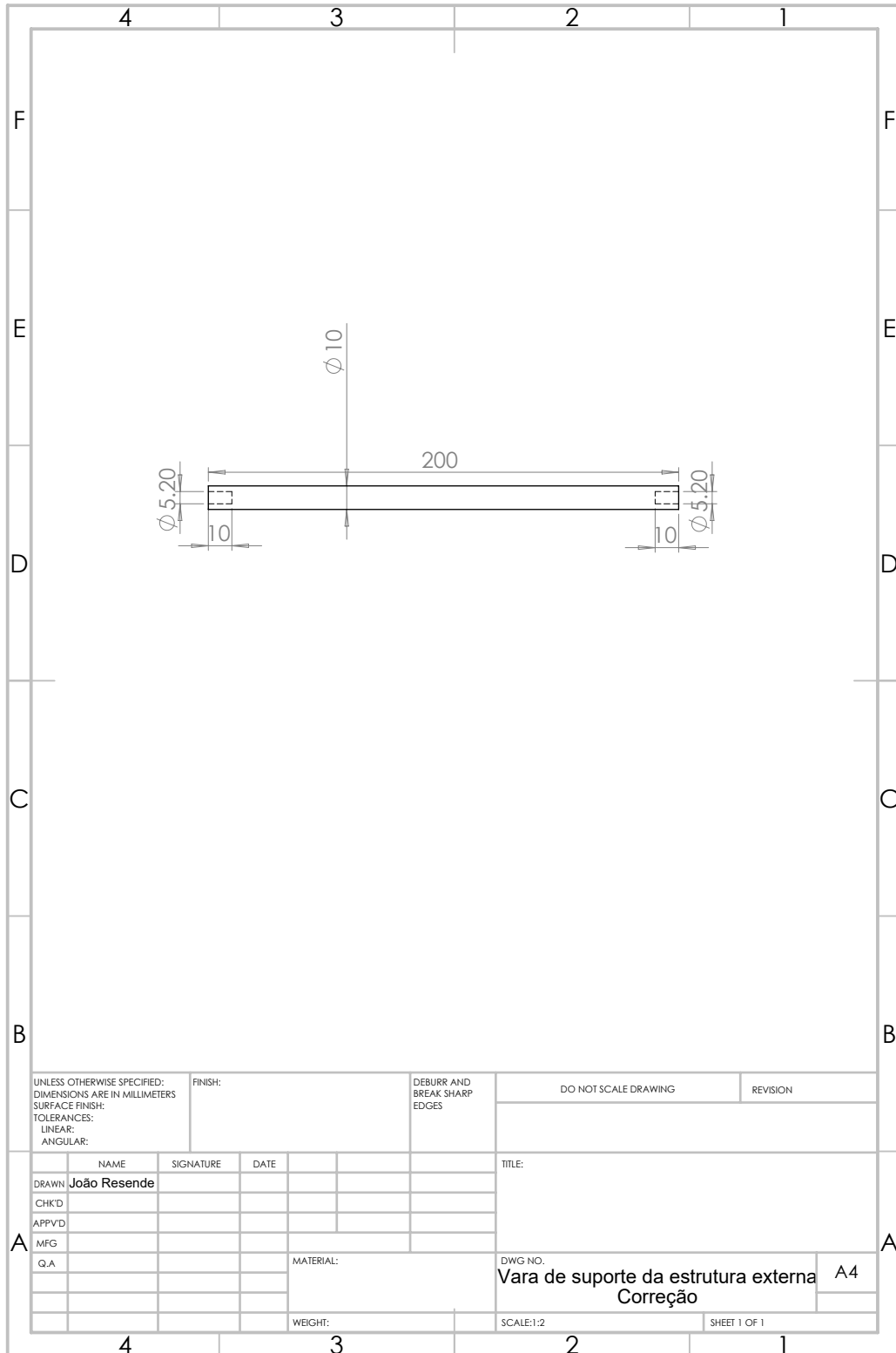
Peças estrutura externa - Secção 1



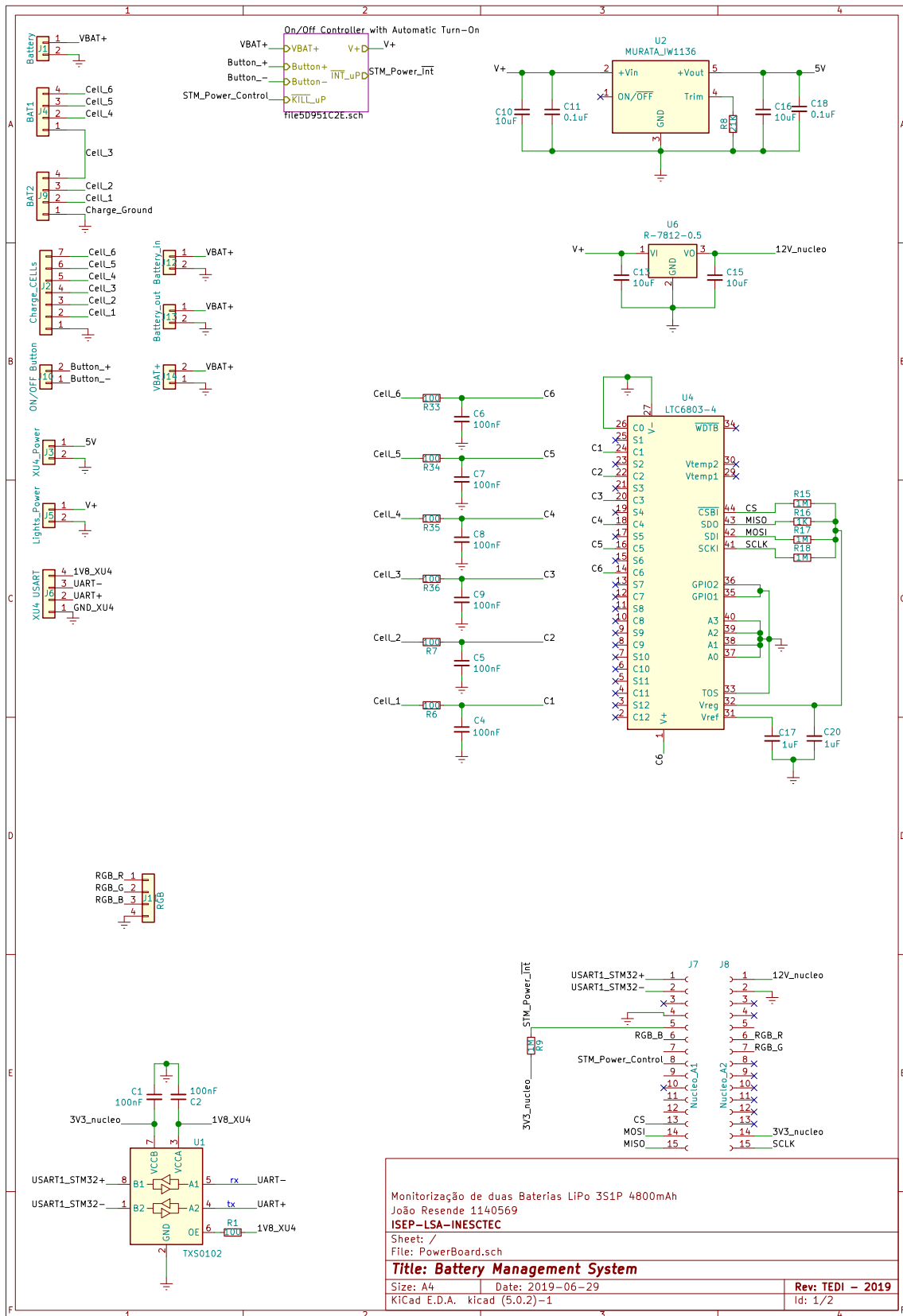
Peças estrutura externa - Secção 2



Peças estrutura externa -Vara de Suporte Correção



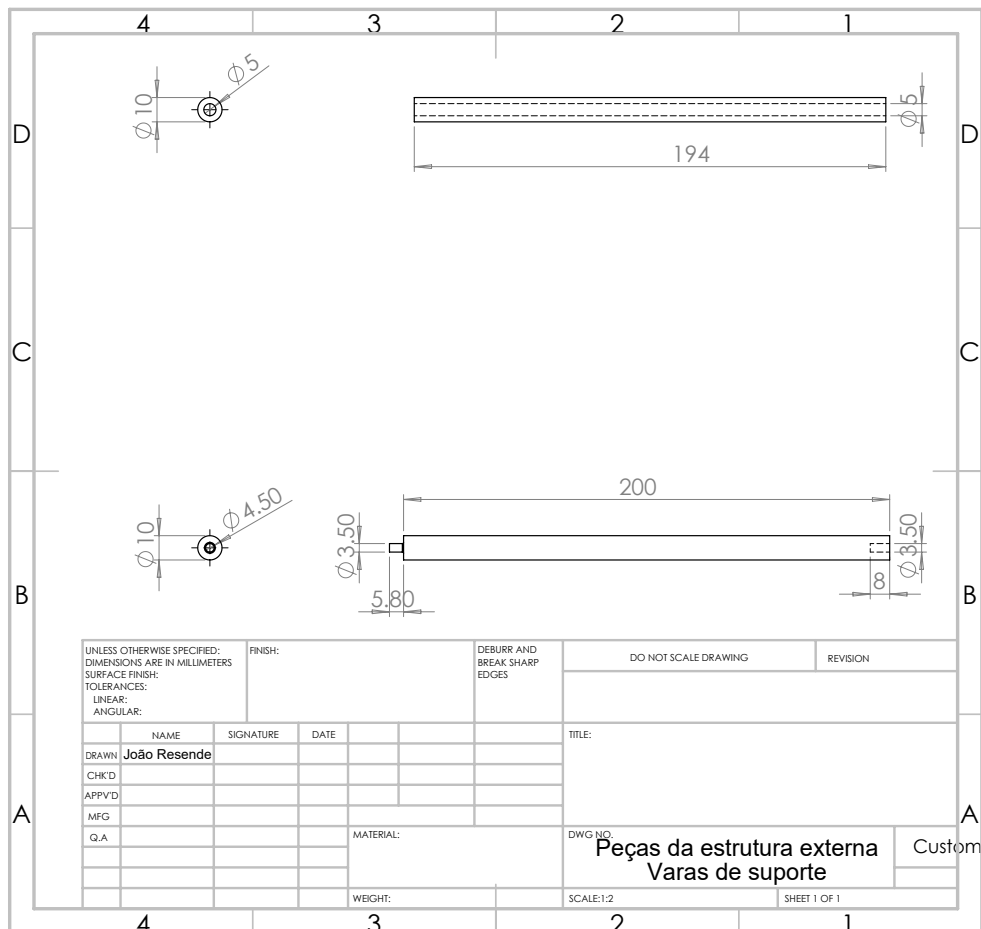
**ESTA PÁGINA
FOI PROPOSITADAMENTE
DEIXADA EM BRANCO**



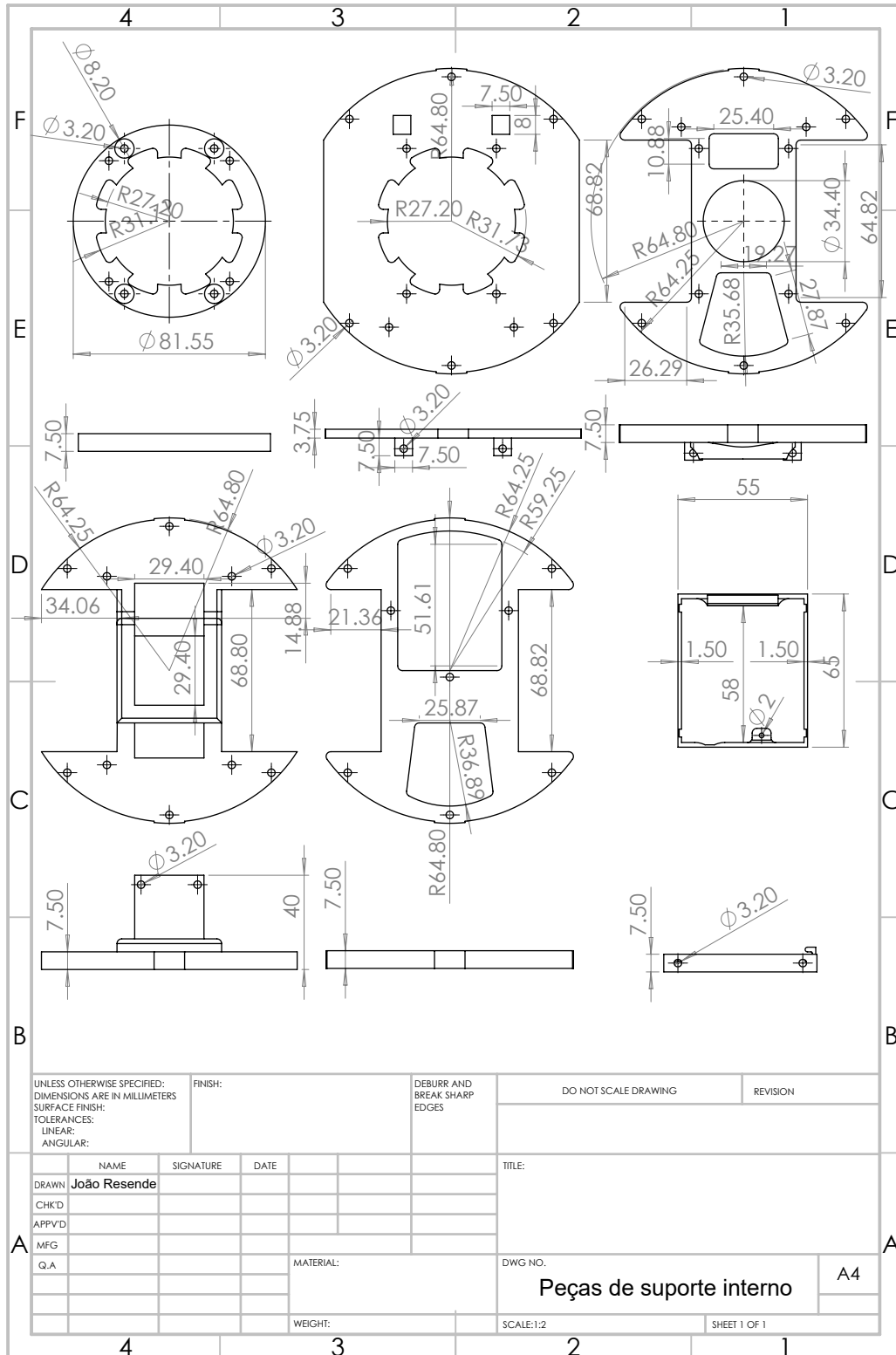
Apêndice E

Desenhos da Estrutura Mecânica Melhorada

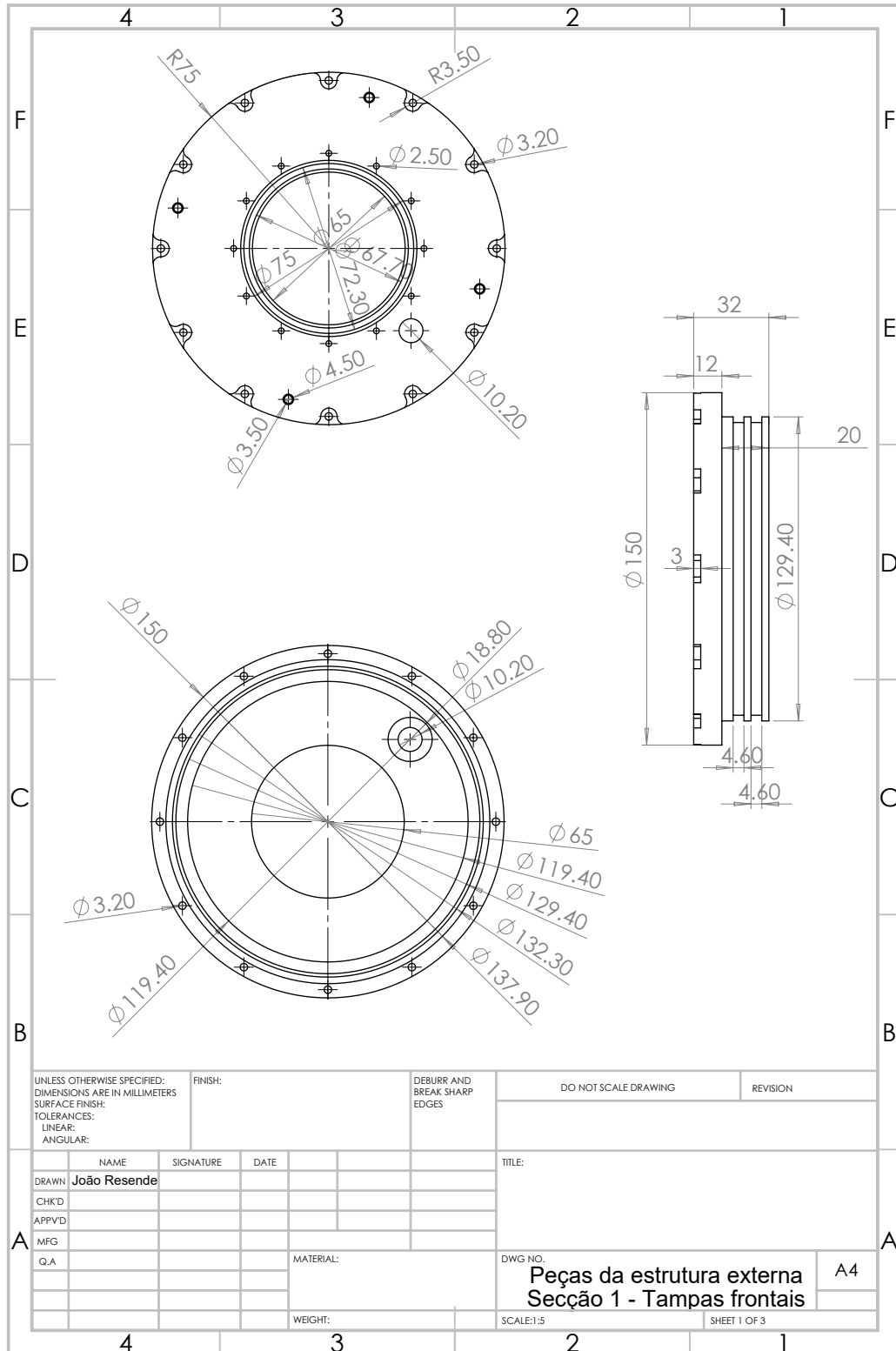
Peças estrutura externa - Varões de Suporte

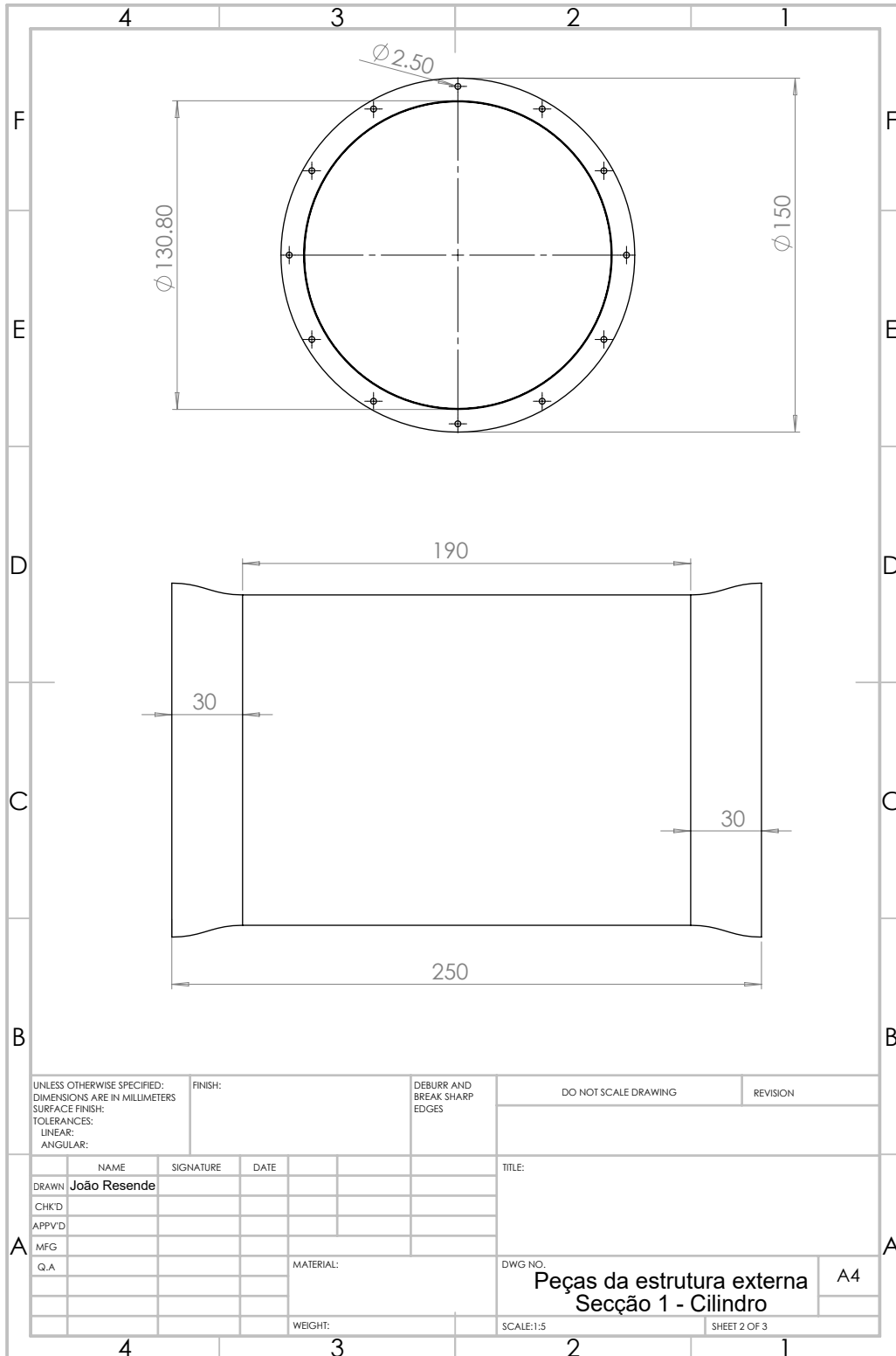


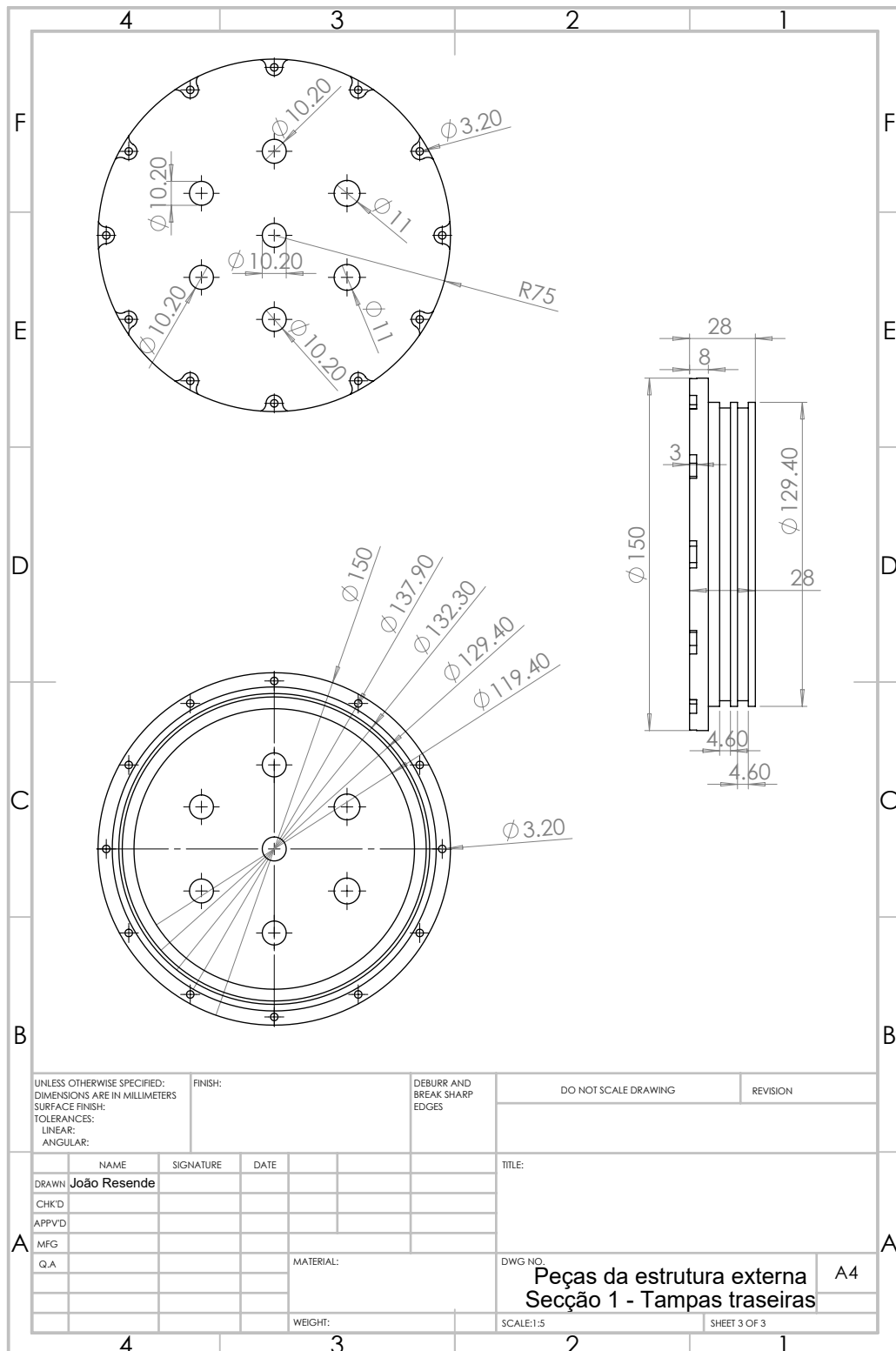
Peças de suporte interno



Peças estrutura externa - Secção 1

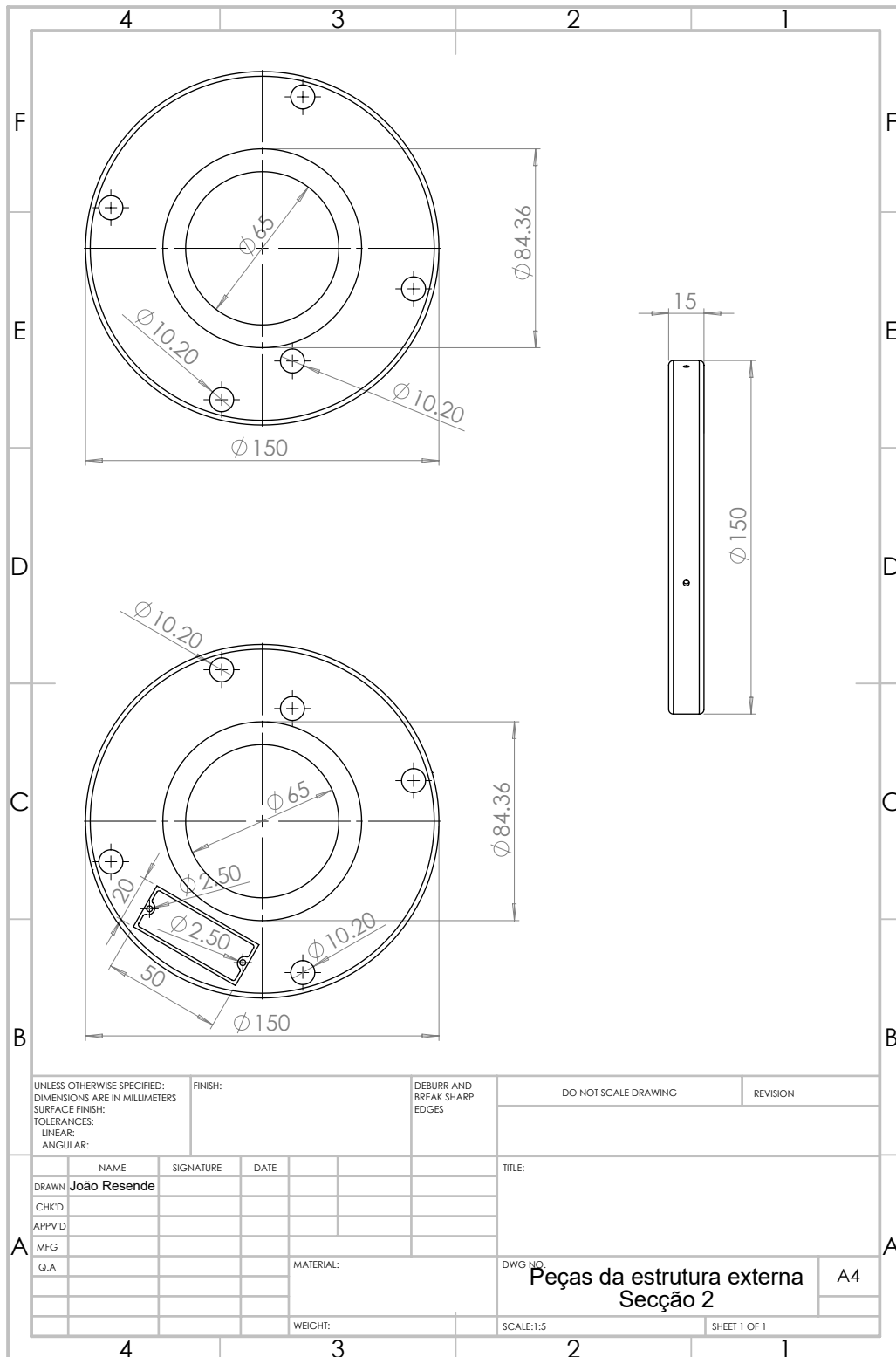




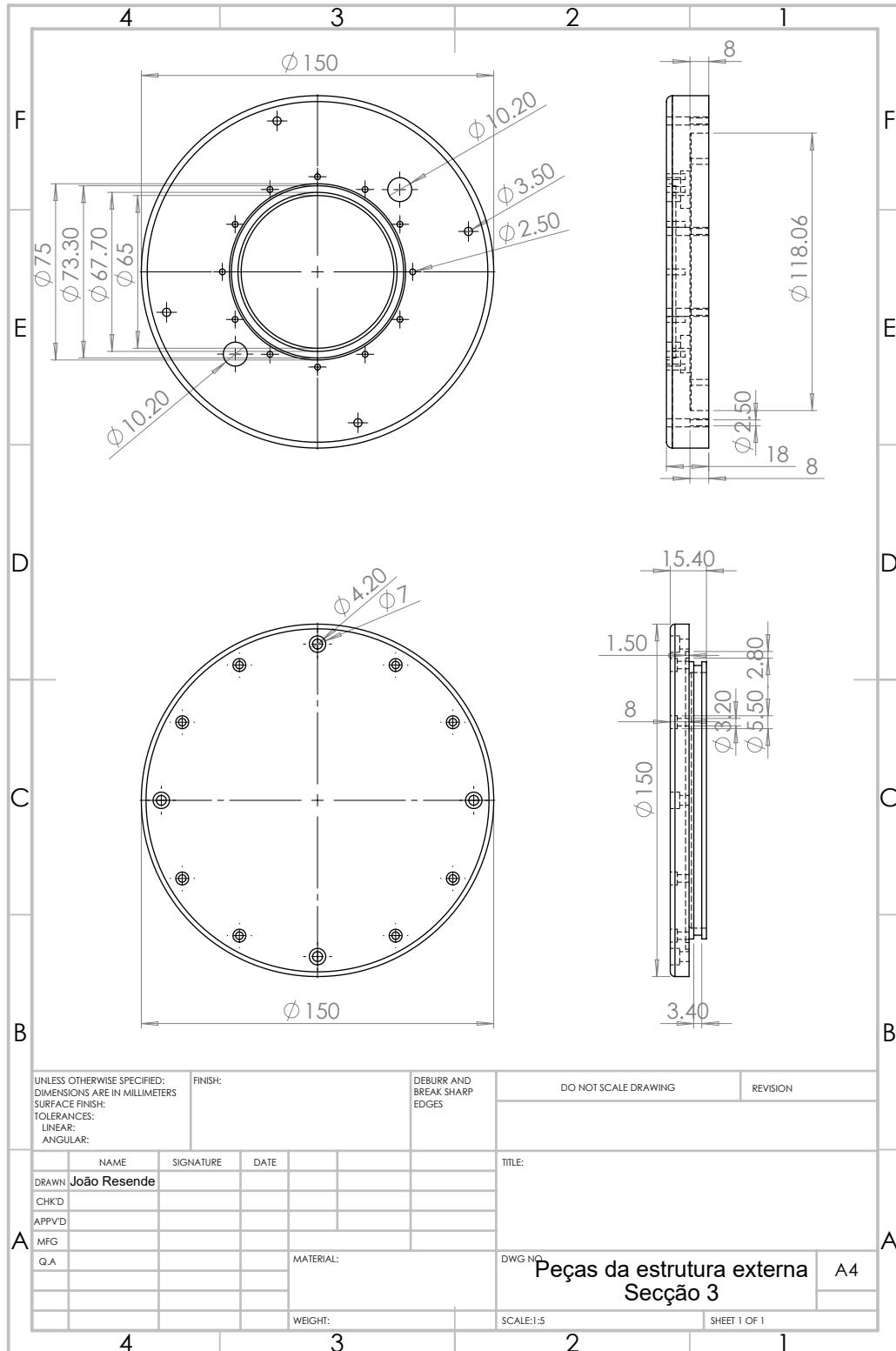


UNLESS OTHERWISE SPECIFIED: DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS SURFACE FINISH: TOLERANCES: LINEAR: ANGULAR:		FINISH:	DEBURR AND BREAK SHARP EDGES		DO NOT SCALE DRAWING	REVISION
DRAWN	NAME	SIGNATURE	DATE		TITLE:	
CHK'D	João Resende					
APP'VD						
MFG						
Q.A				MATERIAL:	DWG NO.	
					Peças da estrutura externa	A4
					Secção 1 - Tampas traseiras	
				WEIGHT:	SCALE:1:5	SHEET 3 OF 3

Peças estrutura externa - Secção 2



Peças estrutura externa - Secção 3



**ESTA PÁGINA
FOI PROPOSITADAMENTE
DEIXADA EM BRANCO**

Apêndice F

Simulação FEM para a Estrutura Mecânica com as Novas Varas

von Mises — 10 bar

Na Figura F.1 é possível observar o resultado obtido da simulação de *von Mises*.

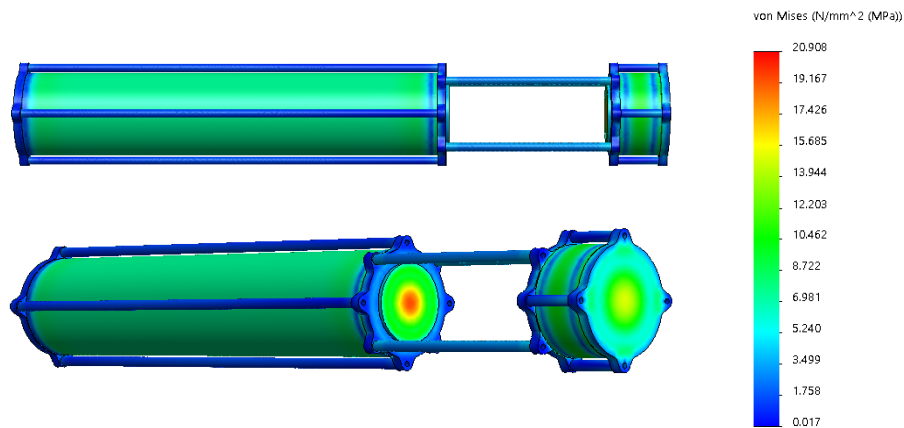


Figura F.1: Resultado da simulação *von Mises* para uma pressão externa de 10 bar.

Após a análise do resultado da simulação, verificou-se que o valor máximo de pressão apresentado na escala de *von Mises*, 20.908 MPa, é atingido na parede interna do cilindro da secção 2, como ilustrado na Figura F.2.

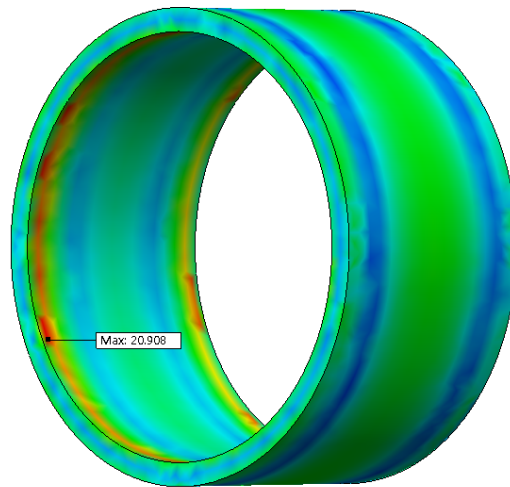


Figura F.2: Valor máximo de pressão interna atingido na estrutura para uma pressão externa de 10 bar.

Deformação — 10 bar

Na Figura F.3 é possível observar o resultado obtido da simulação de *displacement*.

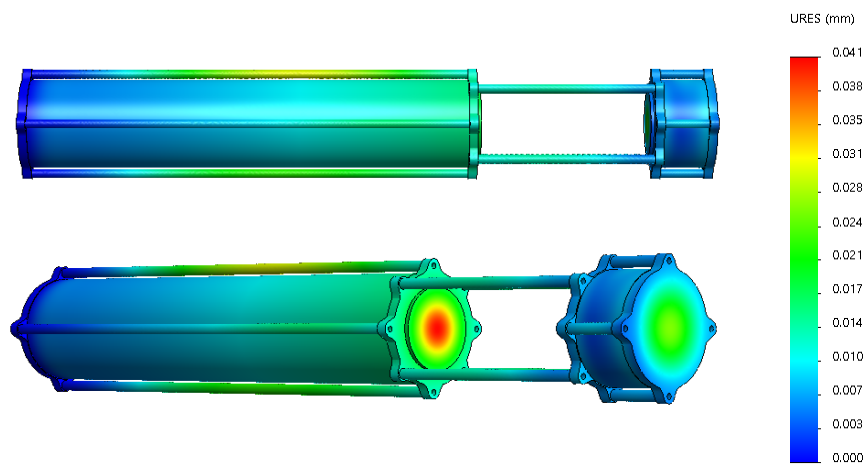


Figura F.3: Resultado da simulação de *displacement* para uma pressão externa de 10 bar.

Após a análise do resultado da simulação, verificou-se que o valor máximo de deformação apresentado na escala de URES, 0.041 mm, é atingido no vidro, como ilustrado na Figura F.4.

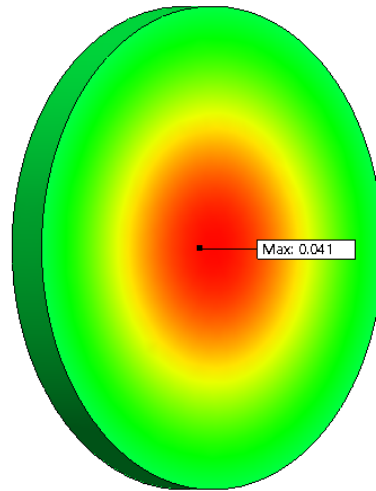


Figura F.4: Valor máximo de deformação atingido na estrutura para uma pressão externa de 10 bar.

von Mises — 100 bar

Na Figura F.1 é possível observar o resultado obtido da simulação de *von Mises*.

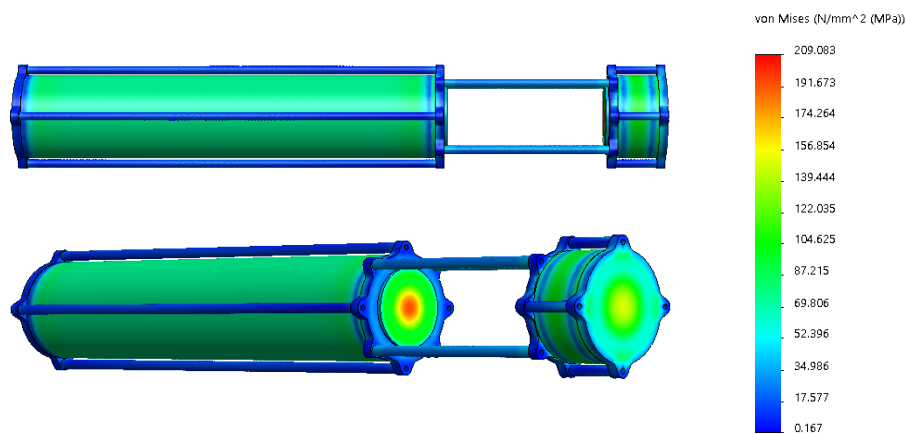


Figura F.5: Resultado da simulação *von Mises* para uma pressão externa de 100 bar.

Após a análise do resultado da simulação, verificou-se que o valor máximo de pressão apresentado na escala de *von Mises*, 209.083 MPa, é atingido na parede interna do cilindro da secção 2, como ilustrado na Figura F.6.

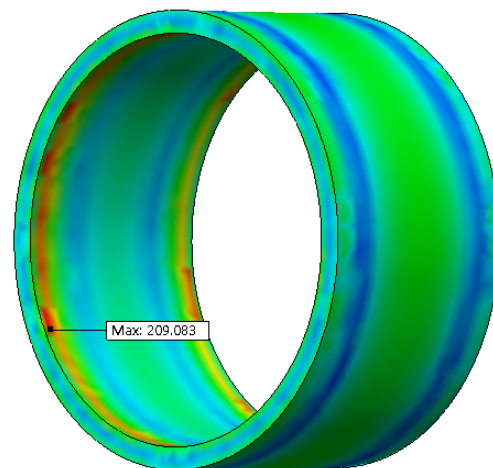


Figura F.6: Valor máximo de pressão interna atingido na estrutura para uma pressão externa de 100 bar.

Deformação — 100 bar

Na Figura F.7 é possível observar o resultado obtido da simulação de *displacement*.

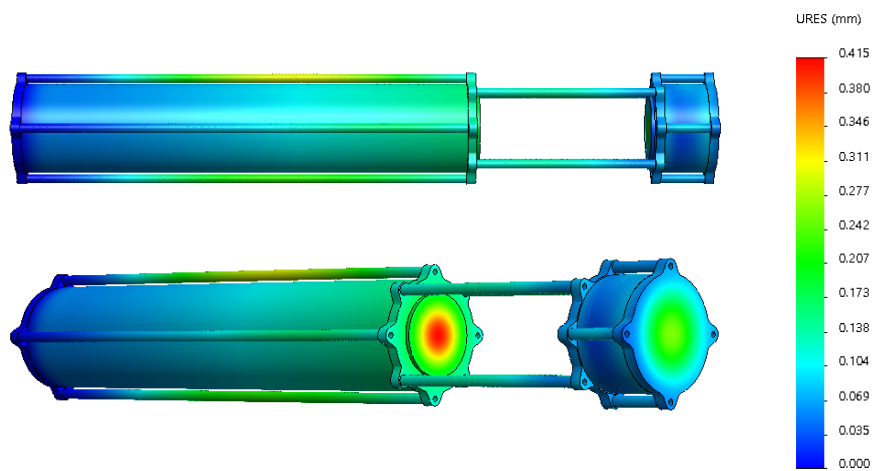


Figura F.7: Resultado da simulação de *displacement* para uma pressão externa de 100 bar.

Após a análise do resultado da simulação, verificou-se que o valor máximo de deformação apresentado na escala de URES, 0.415 mm, é atingido no vidro, como ilustrado na Figura F.8.

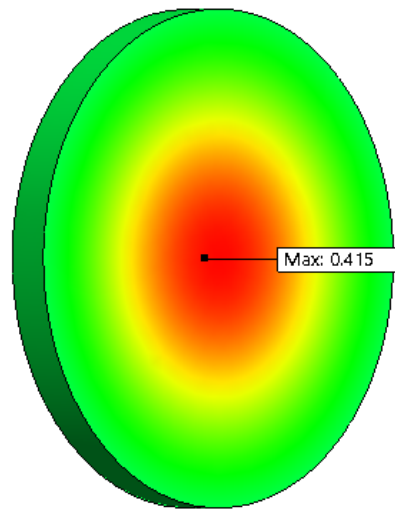


Figura F.8: Valor máximo de deformação atingido na estrutura para uma pressão externa de 100 bar.