



Projeto

Mestrado em Engenharia Eletrotécnica

***SAGuV – Sistema de Alinhamento de Garrafas  
usando Visão***

**Filipe Manuel Ferreira Caetano**

Leiria, *setembro* de 2017





Projeto

Mestrado em Engenharia Eletrotécnica

***SAGuV – Sistema de Alinhamento de Garrafas  
usando Visão***

**Filipe Manuel Ferreira Caetano**

Projeto de Mestrado realizada sob a orientação do Doutor Hugo Filipe Costelha de Castro Professor da Escola Superior de Tecnologia e Gestão do Instituto Politécnico de Leiria e coorientação do Doutor Luís Miguel Ramos Perdigoto Professor da Escola Superior de Tecnologia e Gestão do Instituto Politécnico de Leiria.

Leiria, setembro de 2017

*Esta página foi intencionalmente deixada em branco*

# Dedicatória

---

Para o meu pai que onde está sei que está feliz por mim,  
e para a minha mãe que me continua a incentivar.

*Esta página foi intencionalmente deixada em branco*

# Agradecimentos

---

Antes de mais queria agradecer de forma geral a todos aqueles que contribuíram para que fosse possível a realização deste projeto.

Em primeiro lugar gostaria de agradecer aos meus orientadores, o Professor Doutor Hugo Costelha e ao Professor Doutor Luís Perdigo, pela ajuda e prontidão que sempre apresentaram, a eles o meu sincero obrigado.

Queria fazer um agradecimento especial à minha família. Ao meu pai que sempre lutou e trabalhou por nós, sei que está neste momento orgulhoso, muito obrigado Pai. Um obrigado também à minha mãe que está sempre disponível para ajudar e incentivar, sem ela também não teria chegado até aqui. Queria agradecer também em particular ao meu irmão e namorada que me têm aturado e incentivado.

Quero também agradecer a todos os meus colegas e amigos que me têm acompanhado, obrigado pela vossa amizade e apoio.

*Esta página foi intencionalmente deixada em branco*

# Resumo

---

Na indústria vidreira o armazenamento e paletização de garrafas é um processo de extrema importância sendo necessário que todas as garrafas sejam posicionadas de forma específica. No caso de garrafas não cilíndricas este processo é ainda mais complexo sendo necessário que estas sejam alinhadas/orientadas para que seja possível obter camadas iguais e facilitar a concepção e atuação da componente mecânica de paletização.

Tendo em conta que as garrafas no final de uma linha de transporte têm uma orientação aleatória, este projeto tem como objetivo o desenvolvimento de um sistema de detecção da orientação de garrafas com base em visão artificial, que seja flexível e adaptável a diferentes tipos de garrafas. O sistema deve identificar a orientação de cada garrafa de modo a ser possível enviar essa informação a um sistema atuador que oriente cada garrafa em conformidade com uma orientação previamente definida. O trabalho aqui descrito foca-se na identificação do ângulo de rotação das garrafas e não no sistema de atuação.

Ao longo do projeto são estudadas as necessidades inerentes a um sistema de visão artificial, nomeadamente a iluminação, aquisição e processamento de imagem. Descreve-se o desenvolvimento dos painéis de iluminação do sistema bem como toda a estrutura necessária para a instalação e bom funcionamento do sistema de aquisição de imagem.

É apresentado um algoritmo de processamento de imagem baseado em duas câmaras, posicionadas de forma a captar toda a informação necessária. São ainda apresentados um conjunto de testes finais em condições que se aproximam do normal funcionamento de uma linha de transporte de garrafas, de forma a validar o sistema desenvolvido.

*Palavras-chave: Visão artificial, Processamento de imagem, Indústria vidreira, Alinhamento de garrafas, Iluminação*

*Esta página foi intencionalmente deixada em branco*

# Abstract

---

In the glass manufacturing industry, the storage and palletizing of bottles are processes of extreme importance and it is necessary that all the bottles are placed in a specific way. In the case of non-cylindrical bottles, this process is even more complex. It is necessary that the bottles are aligned / oriented to obtain equal layers as to simplify the design and actions of the mechanical components of the palletizing equipment.

Aware that the bottles at the end of a transport line have a random orientation, the aim of this project is the development of an artificial vision system that detects the bottle orientation and is flexible and adaptable to different types of bottles. The system must identify the orientation of each bottle so that it is possible to send this information to an actuator system that guides each bottle in accordance with a previously defined orientation. The work described here focuses on the identification of the rotation angle of the bottles and not on the actuation system.

Along the development of the project, the needs inherent to an artificial vision system are studied, namely the lighting, image acquisition and image processing. We describe the development of the system lighting panels as well as all the structure necessary for the installation and proper operation of the image acquisition system.

An image processing algorithm is presented based on two cameras positioned as to capture all the necessary information. Also presented are a set of tests in conditions that approximate to the conditions in a real bottle transport line, in order to validate the developed system.

*Keywords: Artificial vision, Image processing, Glass industry, Bottle alignment, Lighting*

*Esta página foi intencionalmente deixada em branco*

# Lista de figuras

---

Figura 1 - Influências sobre o Sistema de Visão [2].	3
Figura 2 - Exemplo de garrafa a orientar.	5
Figura 3 - Comprimentos de onda (nm) e aplicações recomendadas [12].	8
Figura 4 - Iluminação direta [12].	11
Figura 5 - Iluminação de fundo ou Back Light [12].	11
Figura 6 - Iluminação Dark Field [12].	12
Figura 7 - Iluminação difusa em cúpula [12].	13
Figura 8 - Iluminação difusa axial [12].	13
Figura 9 - Iluminação direcional [12].	13
Figura 10 - Iluminação lateral [11].	13
Figura 11 - Ângulo de abertura para várias lentes em câmaras com sensor de 1/3" .	16
Figura 12 - Inspeção no enchimento de garrafas [25].	18
Figura 13 - Orientador de Garrafas desenvolvido pela empresa Glass Soft [33].	20
Figura 14 - Orientador FLEXITURN desenvolvido pela empresa E2M [35].	20
Figura 15 - Arquitetura final do sistema de visão proposto (vista de topo).	24
Figura 16 - Estrutura final do projeto.	24
Figura 17 - Câmara IDS - uEye UI-5240CP-C-HQ.	26
Figura 18 - Software de configuração IDS Camera Manager.	27
Figura 19 - Câmara da Playstation 3 PS3 Eye.	28
Figura 20 - Imagem captada pela webcam na posição lateral.	29
Figura 21 - Esquema para Cálculo das dimensões do painel de iluminação.	30
Figura 22 - Perfil do painel de iluminação com frisos.	30
Figura 23 - Estrutura de testes iniciais.	31
Figura 24 - Teste inicial com um painel de iluminação.	32
Figura 25 - Imagem captada de frente para o painel de iluminação com frisos.	33
Figura 26 - Foto captada com a parte lisa do acrílico virada para a frente.	34
Figura 27 - Foto captada com a parte lisa do acrílico virada para trás.	34
Figura 28 - Imagem captada sem filtro polarizador (shutter 1/200).	34
Figura 29 - Imagem captada com filtro polarizador (shutter 1/80).	34
Figura 30 - Configuração do painel de Iluminação.	35

Figura 31 - Défice de iluminação com dois painéis.....	35
Figura 32 - Painéis afastados e em baixo.....	37
Figura 33 - Painéis afastados e elevados. ....	37
Figura 34 - Painéis próximos e em baixo. ....	37
Figura 35 - Painéis próximos e elevados. ....	37
Figura 36 - Estrutura final com os painéis próximos do transportador e altos. ....	37
Figura 37 - Painéis de LEDs pequeno junto a base da garrafa e respetivo resultado. ....	38
Figura 38 - Painéis de LEDs pequenos no topo e oblíquos a apontar para o gargalo da garrafa e respetivo resultado .....	38
Figura 39 - Painéis de LEDs pequenos no topo e na zona de entrada/saída da garrafa e respetivo resultado.....	38
Figura 40 - Painéis de LEDs pequenos no topo a apontar para o gargalo da garrafa juntos à câmara e respetivo resultado.....	38
Figura 41 - Cúpula para iluminação difusa em domo.....	39
Figura 42 - Resultados retirados da iluminação com cúpula a) Com os painéis laterais ligados, b) com os painéis laterais desligados.....	40
Figura 43 - Referencial usado nos algoritmos desenvolvidos. ....	45
Figura 44 - Fluxo do processo. ....	46
Figura 45 - Arquitetura algoritmo câmara de topo. ....	47
Figura 46 - Exemplo de uma imagem capturada pela webcam PS3 Eye. ....	48
Figura 47 - Threshold sem Dilate e Erode VS Threshold com Dilate e Erode.....	49
Figura 48 - Aplicação do Convex Hull, a) deteção de múltiplas formas e b) deteção de apenas uma forma.....	50
Figura 49 - Problema do método do retângulo. ....	51
Figura 50 - Funcionamento do ICP com a) Valor "0" na matriz rotação b) Valor do ângulo obtido pelo método do retângulo na matriz rotação. ....	53
Figura 51 - Garrafa simétrica em 2 eixos (Garrafa do tipo A) .....	54
Figura 52 - Garrafa simétrica em apenas 1 eixo (Garrafa do tipo B) .....	54
Figura 53 - Garrafa em duas posições simétricas, -40° e 140°.....	55
Figura 54 - Arquitetura algoritmo câmara lateral. ....	56
Figura 55 - Exemplo de imagem captada através da câmara uEye da IDS. ....	57
Figura 56 - Filtro de Sobel aplicado a duas imagens capturadas pela câmara lateral.....	58
Figura 57 - Gráfico com soma do valor do peso de todos os píxeis por coluna.....	58
Figura 58 - Filtro Sobel para várias rotações.....	60

Figura 59 - Obtenção de contorno pelo Teach-in.....	61
Figura 60 - <i>Diagrama do funcionamento proposto com threads e mutex para garrafas tipo A</i> .....	62
Figura 61 - Diagrama do funcionamento proposto com threads e mutex para garrafas tipo B. ....	62
Figura 62 - Exemplo de resultado usado como debug. ....	66
Figura 63 - Garrafa 1 vista em perspectiva.....	67
Figura 64 - Garrafa 1 vista de cima.....	67
Figura 65 - Garrafa 1 vista lateral .....	67
Figura 66 - Garrafa 2 vista em perspectiva.....	67
Figura 67 - Garrafa 2 vista de cima.....	67
Figura 68 - Garrafa 2 vista lateral .....	67
Figura 69 - Garrafa 3 vista em perspectiva.....	68
Figura 70 - Garrafa 3 vista de cima.....	68
Figura 71 - Garrafa 3 vista lateral .....	68
Figura 72 - Bilateral filter + Threshold OTSU / Threshold / Threshold OTSU – Resultados e tempos. ....	69
Figura 73 - Teste 1 - ICP normal para o ângulo de 20°. ....	72
Figura 74 - Teste 2 - ICP sem pontos centrais no modelo para o ângulo de 20°. ....	72
Figura 75 - Teste 3 - ICP sem cálculo da translação para o ângulo de 20°. ....	73
Figura 76 - Teste 4 - ICP sem pontos centrais no modelo e sem cálculo da translação para o ângulo de 20°. ....	73
Figura 77 - Teste 1 - ICP normal para o ângulo de 20°, câmara PS3 Eye. ....	74
Figura 78 - Teste 2 - ICP sem pontos centrais no modelo para o ângulo de 20°, câmara PS3 Eye. ....	75
Figura 79 - Testes câmara lateral e filtro Canny. ....	76
Figura 80 - Aplicação do filtro Sobel (sem e com gradiente em x), Schaar (sem e com gradiente em x) e Laplaciano.....	77
Figura 81 - Resultados da aplicação de filtro para suavizar a imagem captada.....	78
Figura 82 - Teste com painel de iluminação da câmara a) desligado b) ligado. ....	79
Figura 83 - Análise do resultado dos filtros. ....	80
Figura 84- Garrafa 1 - Pico em X e N.º pixéis brancos (valores normalizados). ....	82
Figura 85 - Garrafa 2 - Pico em X e N.º pixéis brancos (valores normalizados). ....	83
Figura 86 - Garrafa 3 - Pico em X e N.º pixéis brancos (valores normalizados). ....	83

Figura 87 - Teste com duas câmaras garrafa 1 ângulo 160°.....	87
Figura 88 - Teste com duas câmaras garrafa 2 ângulo 160°.....	87
Figura 89 - Teste com duas câmaras garrafa 3 ângulo 160°.....	87
Figura 90 - Teste com duas câmaras garrafa 1 ângulo -40°.....	87
Figura 91 - Teste com duas câmaras garrafa 2 ângulo -40°.....	88
Figura 92 - Teste com duas câmaras garrafa 3 ângulo -40°.....	88
Figura 93 - Teste com garrafa 1 em movimento e 140° de rotação.....	90
Figura 94 - Teste com garrafa 2 em movimento e 140° de rotação.....	90
Figura 95 - Teste com garrafa 3 em movimento e 140° de rotação.....	91
Figura 96 - Teste com garrafa 1 em movimento e -110° de rotação. ....	91
Figura 97 - Teste com garrafa 2 em movimento e -110° de rotação. ....	91
Figura 98 - Teste com garrafa 3 em movimento e -110° de rotação. ....	92
Figura 99 - Teste com garrafa 1 em movimento e 140° de rotação, Resultado do Sobel. .....	92
Figura 100 - Teste com garrafa 2 em movimento e -110° de rotação, Resultado do Convex Hull e ICP. ....	92
Figura 101 - Teste sem debug para 0° garrafa 1 (Retangular) em movimento.....	93
Figura 102 - Teste sem debug para 180° garrafa 2 (Oval pequena) em movimento .	93
Figura 103 - Teste sem debug para 50° garrafa 3 (D Shape) em movimento.....	93
Figura 104 - Teste sem debug para -70° garrafa 1 (Retangular) em movimento .....	93

*Esta página foi intencionalmente deixada em branco*

# Lista de tabelas

---

Tabela 1 - Comparação de vários tipos de iluminação [10] [11].	9
Tabela 2 - Características de interfaces de câmaras [14] [15].	15
Tabela 3 - Especificações da câmara uEye UI-5240CP-C-HQ.	26
Tabela 4 - Especificações da webcam PS3 Eye.	28
Tabela 5 - Dimensões dos painéis de iluminação (Largura x Altura x Espessura).	32
Tabela 6 - Valores do ICP com e sem valor inicial de rotação.	70
Tabela 7 - Análise dos dados aos testes do ICP câmara IDS.	71
Tabela 8 - Análise dos dados aos testes do ICP câmara PS3 Eye.	74
Tabela 9 - Velocidade de processamento de cada um dos filtros.	80
Tabela 10 - Dados e resultados da análise dos gráficos de três garrafas distintas e para várias posições de orientação.	81
Tabela 11 - Testes com as duas Câmaras e garrafa 1 (Retangular) estática.	85
Tabela 12 - Testes com as duas Câmaras e garrafa 2 (Oval pequena) estática.	85
Tabela 13 - Testes com as duas Câmaras e garrafa 3 (D Shape) estática.	86
Tabela 14 - Teste com duas câmaras e garrafa 1 (Retangular) em movimento.	89
Tabela 15 - Teste com duas câmaras e garrafa 2 (Oval pequena) em movimento.	89
Tabela 16 - Teste com duas câmaras e garrafa 3 (D Shape) em movimento.	89
Tabela 17 - Tempos de processamento do algoritmo sem debug.	93
Tabela 18 - Teste com garrafa tipo B (D shape).	94

*Esta página foi intencionalmente deixada em branco*

# Lista de siglas

---

Bpm – *Bottles per minute*

LED – *Light-Emitting Diode*

SMD – *Surface-Mounted Device*

FOV – *Field Of View*

CCD – *Charge-Coupled Device*

CMOS – *Complementary Metal-Oxide Semiconductor*

GUI – *Graphical User Interface*

OpenCV – *Opens-source Computer Vision*

IDE – *Integrated Development Environment*

PLC – *Programmable logic controller*

HMI – *Human machine interface*

IP – *Internet Protocol*

ROI – *Region of Interest*

FPS – *Frames Per Second*

ICP – *Iterative Closest Point*

SVD – *Singular Value Decomposition*

PbE – *Programming by Example*



*Esta página foi intencionalmente deixada em branco*

# Índice

---

<b>DEDICATÓRIA</b>	<b>III</b>
<b>AGRADECIMENTOS</b>	<b>V</b>
<b>RESUMO</b>	<b>VII</b>
<b>ABSTRACT</b>	<b>IX</b>
<b>LISTA DE FIGURAS</b>	<b>XI</b>
<b>LISTA DE TABELAS</b>	<b>XVI</b>
<b>LISTA DE SIGLAS</b>	<b>XVIII</b>
<b>ÍNDICE</b>	<b>XXI</b>
<b>1. INTRODUÇÃO</b>	<b>2</b>
1.1. Motivação e Objetivos -----	4
1.2. Estrutura do Documento -----	5
<b>2. ESTADO DA ARTE</b>	<b>7</b>
2.1. Conceitos Introdutórios -----	7
2.1.1. Iluminação -----	7
2.1.2. Características das Câmaras e Lentes-----	13
2.1.3. Ferramentas de desenvolvimento de Sistemas de Visão-----	16
2.2. A Visão Artificial na Indústria -----	17
2.3. Sistemas de Alinhamento Existentes no Mercado-----	19
<b>3. DESENVOLVIMENTO DA ESTRUTURA</b>	<b>23</b>

<b>3.1.</b>	<b>Configuração do Sistema</b>	<b>23</b>
<b>3.2.</b>	<b>Sistema de Aquisição – Câmaras e Lentes</b>	<b>25</b>
3.2.1.	Câmara IDS – uEye UI-5240CP-C-HQ	25
3.2.2.	Webcam - Sony PS3 Eye	27
<b>3.3.</b>	<b>Iluminação</b>	<b>29</b>
3.3.1.	Desenvolvimento dos Painéis de Iluminação	30
3.3.2.	Testes Adicionais	37
<b>3.4.</b>	<b>Considerações Finais</b>	<b>40</b>
<b>4.</b>	<b>DESENVOLVIMENTO DO ALGORITMO</b>	<b>43</b>
<b>4.1.</b>	<b>Ferramentas de Desenvolvimento</b>	<b>43</b>
<b>4.2.</b>	<b>Descrição do Algoritmo e Implementação</b>	<b>44</b>
4.2.1.	Câmara de Topo	46
<b>4.2.2.</b>	<b>Câmara Lateral</b>	<b>55</b>
4.2.3.	Resultado final	59
4.2.4.	<i>Teach-In</i> – Obtenção do Modelo	60
4.2.5.	<i>Threads</i> e <i>Mutexs</i>	61
<b>4.3.</b>	<b>Considerações Finais</b>	<b>63</b>
<b>5.</b>	<b>TESTES E RESULTADOS FINAIS</b>	<b>65</b>
<b>5.1.</b>	<b>Testes Efetuados</b>	<b>65</b>
5.1.1.	Garrafas utilizadas	66
5.1.2.	<i>Threshold</i> Imagem de Topo	68
5.1.3.	ICP – <i>Iterative Closest Point</i>	69
5.1.4.	Câmara topo, IDS VS Webcam	75
5.1.5.	Filtros Imagem Lateral	76
<b>5.2.</b>	<b>Validação do Sistema</b>	<b>84</b>
5.2.1.	Testes com as duas Câmaras e Garrafa Estática	84
5.2.2.	Testes com as duas Câmaras e Garrafa em Movimento	88
5.2.3.	Testes Finais sem Informação de <i>Debug</i>	93
5.2.4.	Testes com Garrafa Tipo B	94
<b>5.3.</b>	<b>Considerações finais</b>	<b>95</b>

<b>6.</b>	<b>CONCLUSÕES</b>	<b>97</b>
6.1.	Conclusão -----	97
6.2.	Trabalho Futuro -----	98
	<b>BIBLIOGRAFIA</b>	<b>99</b>
	<b>ANEXOS</b>	<b>103</b>
1.	<b>CÁLCULO PAINEL ILUMINAÇÃO</b>	<b>103</b>
2.	<b>INSTALAR E UTILIZAR O OPENCV EM WINDOWS</b>	<b>105</b>
3.	<b>INSTALAR A WEBCAM PS3EYE</b>	<b>109</b>
4.	<b>INSTALAR VISUAL STUDIO E OPENCV</b>	<b>113</b>





# 1. Introdução

---

Nos primórdios da industrialização os processos de produção eram bastante diferentes dos atuais, recorrendo maioritariamente ao trabalho humano.

O aumento da exigência dos consumidores que impõem critérios de qualidade cada vez mais rigorosos, aliados à crescente concorrência industrial, conduziu à melhoria e atualização de todos os processos de produção. A necessidade de tornar este processo mais fiável e robusto levou os fabricantes a substituir, ou complementar a componente humana por sistemas automáticos, de modo a tornar este trabalho mais rápido e eficiente reduzindo o número de falhas ao longo dos processos.

Atualmente alguns destes processos deixam também de ter apenas componente mecânica e passam também a incorporar a componente de visão, sendo maioritariamente aplicado em sistemas de inspeção de qualidade. No entanto um sistema de visão pode ter outras aplicações que não só a inspeção de qualidade de produtos, podendo ser aplicado na realização de muitas outras tarefas, tais como medição de dimensões de objetos ou de distâncias entre objetos, em sistemas automáticos de montagem ou em sistemas *pick and place* [1].

É aceitável afirmar, que o grande objetivo de um sistema de visão passa por extrair informação útil do sistema. Estes processos envolvem a seleção de uma câmara e iluminação adequadas, bem como do desenvolvimento de algoritmos de processamento de imagem. Existem muitos outros fatores a ter em consideração de modo a que um sistema de visão se torne, um sistema robusto, eficiente e rápido tal como exemplificado no diagrama da Figura 1 [2] [3].



Figura 1 - Influências sobre o Sistema de Visão [2].

Deste modo é possível afirmar que a implementação de um sistema de visão está assente em 3 pontos, iluminação, aquisição e processamento.

Nos últimos anos os sistemas de visão têm crescido tanto em termos do número de aplicações como a nível de maturidade tecnológica. Segundo dados do relatório da empresa MarketsandMarkets prevê-se que o mercado das máquinas de visão cresça de 8,12 mil milhões de dólares em 2015 para 14,43 mil milhões de dólares em 2022, com uma taxa de crescimento anual de 8,15% [4].

A indústria vidreira é uma indústria importante e em crescimento. Segundo dados de 2014, houve um aumento de produção de 1,6% na indústria vidreira europeia, e foram vendidos mais de 22 milhões de toneladas de embalagens de vidro, correspondentes a cerca de 50 mil milhões de embalagens [5]. Esta indústria é um caso particular onde tem havido um crescimento elevado na utilização de visão artificial na automatização dos processos. Verificando-se a tendência na substituição de equipamento de apenas componente mecânica, complementando-a com a componente de visão artificial.

## 1.1. Motivação e Objetivos

---

As embalagens de vidro produzidas podem ser de diversos tipos desde frascos a garrafas e nem todas as embalagens são de formato circular e regular, podendo ter os mais diversos formatos consoante a exigência do cliente. É sobre o transporte e paletização de garrafas de vidro ditas “não regulares” que se foca a motivação deste trabalho.

O processo de fabrico de vidro está dividido em várias fases e zonas, a parte quente, onde é feita a composição das matérias-primas, a sua fusão e moldagem, posterior recozimento e tratamento do vidro, e a parte fria, onde as garrafas são transportadas, inspeccionadas e embaladas. Esta inspeção pode ser feita através de sistemas automáticos baseados em visão artificial [6] [7] [8] [9].

O início do processo de embalagem dá-se na entrada do paletizador, e o alinhamento automático de garrafas à saída de uma linha de inspeção traz vantagens ao nível do seu armazenamento/paletização, em especial em garrafas de formato não circular. A utilização de sistemas de visão artificial na identificação da orientação das garrafas permite obter uma grande flexibilidade e adaptabilidade a diferentes tipos e formatos de garrafas, facilitando o trabalho dos sistemas mecânicos de atuação e a paletização das garrafas por camadas.

O processo de rotulagem de garrafas é outra situação onde poderá ser instalado um sistema de alinhado como o proposto, para que o rótulo seja aplicado sempre na mesma face da garrafa.

Neste projeto é proposto desenvolver-se um sistema de alinhamento de garrafas de formato simétrico não circular (Figura 2) com base em visão artificial, com o objetivo de ser incorporado na indústria vidreira mais especificamente numa linha de transporte e inspeção de vidro de embalagem. O sistema proposto deve reconhecer o posicionamento atual de uma garrafa para que possa ser orientada para uma posição específica previamente definida. A orientação da garrafa deve ter em conta o seu formato bem como a presença de uma gravação numa das faces da garrafa. Estas características levam a que o sejam necessárias duas câmaras para o sistema de aquisição, uma que reconheça o formato da garrafa e outra a localização do logotipo na garrafa (gravura). Definiu-se um valor de erro máximo desejável de 6° e que fosse possível analisar no mínimo 150 garrafas por minuto (bpm).



*Figura 2 - Exemplo de garrafa a orientar.*

Este projeto nasceu através de uma ideia concreta por parte da empresa ICEBEL, no entanto, não foi possível obter durante o período de desenvolvimento do projeto, acesso ao equipamento industrial de transporte e alinhamento de garrafas, pelo se desenvolveu apenas um sistema protótipo que implementa a componente de detecção da rotação a aplicar à garrafa.

## **1.2. Estrutura do Documento**

---

No primeiro capítulo é feita uma análise introdutória ao problema proposto, sendo apresentadas as motivações e objetivos que levaram à elaboração deste projeto.

No segundo capítulo são apresentados alguns conceitos introdutórios sobre iluminação, câmaras e ferramentas de desenvolvimento. É ainda explicado de que forma é importante a visão artificial na indústria, nomeadamente na indústria vidreira sendo ainda apresentados alguns equipamentos semelhantes já existentes no mercado.

O desenvolvimento da estrutura e *hardware* do sistema proposto é explicado no terceiro capítulo. Neste capítulo é feita a descrição do sistema de iluminação elaborado bem como de todo o processo que levou ao resultado final. Neste capítulo é ainda descrito o sistema de aquisição de imagem utilizado ao longo do desenvolvimento do projeto.

No quarto capítulo é feita a descrição do trabalho desenvolvido a nível de *software*, começando pelas ferramentas utilizadas para tal. Neste capítulo é ainda apresentada a arquitetura do sistema e a descrição do que foi desenvolvido a nível de *software*.

Os testes e resultados efetuados são apresentados no quinto capítulo, incluindo os testes finais de validação do sistema proposto.

Por fim, no sexto e último capítulo, são apresentadas as conclusões do trabalho bem como o trabalho futuro a desenvolver.

Em anexo são apresentados os cálculos do painel de iluminação bem como alguns procedimentos criados ao longo do projeto, que incluem a descrição dos processos de instalação e configuração do *software* de suporte utilizado.

## 2. Estado da Arte

---

Este capítulo começa com uma descrição de conceitos introdutórios inicialmente estudados, sendo de seguida apresentada de uma forma geral o panorama da visão na indústria com especial atenção à indústria vidreira. Por fim são apresentados outros sistemas de alinhamento existentes no mercado.

### 2.1. Conceitos Introdutórios

---

Neste subcapítulo são apresentados os conceitos introdutórios de suporte ao desenvolvimento do projeto. Aqui são abordados conceitos introdutórios sobre iluminação, câmaras e lentes, bem como algumas ferramentas para desenvolvimento de aplicações de sistemas de visão.

#### 2.1.1. Iluminação

---

Na visão artificial tudo depende da aquisição de imagem, e a aquisição de imagem depende em grande parte da iluminação. Apesar de um algoritmo poder ser desenvolvido de forma robusta este poderá ser simplificado se o sistema de iluminação e aquisição de imagem estiverem bem dimensionados [2].

Para dimensionar um sistema de iluminação devem ser tidas em conta diversos fatores nomeadamente a temperatura de cor ou a técnica de iluminação utilizada tal como é descrito em baixo, de forma a ser possível captar pelo sistema de aquisição toda a informação necessária para o processamento do algoritmo.

## Características e Tipos de Iluminação

Sendo o sistema de iluminação uma questão crucial num sistema de visão artificial, ele deve ser desenhado de acordo com as necessidades específicas do sistema, existindo diversas soluções para as diferentes necessidades. A iluminação fluorescente, de halogéneo e de LED surgem como as formas de iluminação mais comuns em sistemas de visão artificial principalmente em sistemas de pequena e média dimensão. Em sistemas de maior dimensão ou que exijam uma fonte de iluminação muito forte a iluminação de vapor de sódio, xénon ou mercúrio são os tipos de iluminação mais comuns [10] [11].

Outra característica a ter em conta é a temperatura de cor da iluminação. A escolha da melhor temperatura de cor depende essencialmente de dois fatores, do objeto em questão, particularmente a sua cor, e da sensibilidade do sensor da câmara. Na Figura 3 é apresentado um diagrama com os comprimentos de onda e as respetivas temperaturas de cor bem como as aplicações que se melhor enquadram nelas.

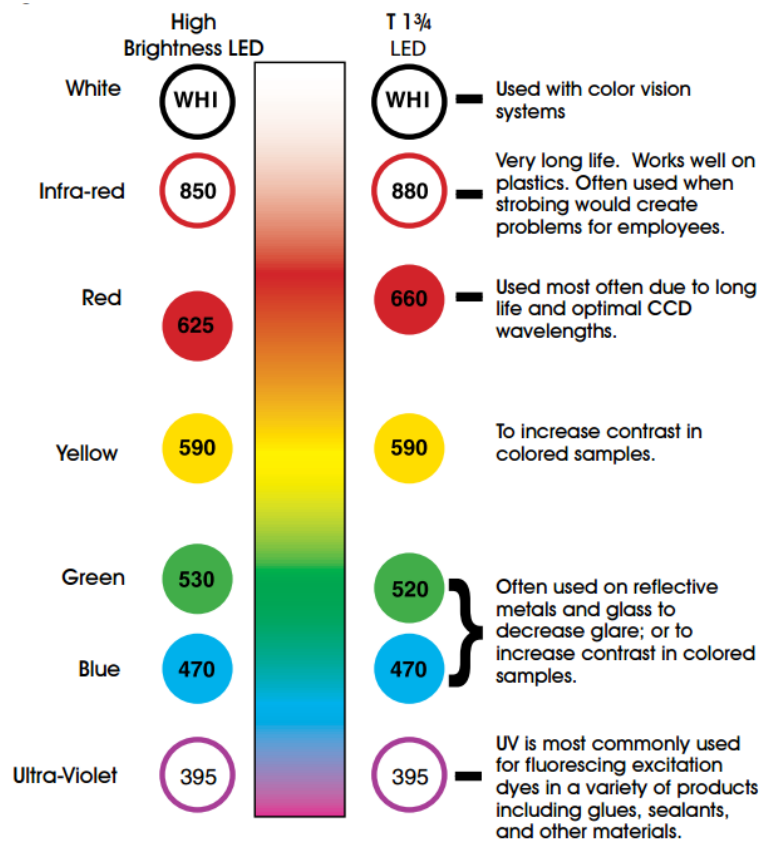


Figura 3 - Comprimentos de onda (nm) e aplicações recomendadas [12].

Poderá também ser conveniente ter em conta a componente espectral da fonte de luz de modo a enquadrar com a sensibilidade da câmara usada no sistema de visão. Câmaras com um sensor CMOS são mais sensíveis à luz infravermelhas do que uma câmara equivalente com um sensor CCD, o que poderá ser uma vantagem em sistemas com pouca iluminação quando é usado um tipo de iluminação na onda do infravermelho [10].

O uso de filtros conjugado com a componente espectral de um determinado tipo de iluminação pode ser altamente vantajoso para o sistema de visão, como por exemplo de modo anular o ruído criado pela iluminação ambiente na envolvente ao sistema.

De forma comparativa e como auxiliar à escolha do tipo de iluminação é apresentado na Tabela 1, informação relativa a vários tipos de iluminação disponíveis, comparando vantagens, desvantagens e vários tipos de aplicações para cada um dos tipos de iluminação mais usuais.

*Tabela 1 - Comparação de vários tipos de iluminação [10] [11].*

<b>Tipo de Iluminação</b>	<b>Vantagem</b>	<b>Desvantagem</b>	<b>Tipos de Aplicação</b>
Incandescente	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Baixo custo;</li> <li>- Componente no espectro do infravermelho;</li> <li>- Variação de intensidade.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Aquecimento;</li> <li>- Perda de intensidade com o tempo;</li> <li>- Distribuição não uniforme;</li> <li>- Curto tempo de vida;</li> <li>- Frágil.</li> </ul>	Este tipo de iluminação deixou de ser considerado em sistemas de visão/inspeção a partir do momento que se percebeu a importância do sistema de iluminação na aplicação global.
Fluorescente	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Baixo custo;</li> <li>- Baixo consumo;</li> <li>- Distribuição difusa com uniformidade razoável;</li> <li>- Baixo nível de aquecimento;</li> <li>- Durabilidade;</li> <li>- Pode existir com diferentes gases de modo a funcionar com diferentes espectros.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Maior volume;</li> <li>- Frágil;</li> <li>- Baixa intensidade luminosa;</li> <li>- Forma e tamanho limitado.</li> </ul>	Máquinas de inspeção de pequena e média dimensão; Aplicações que requerem grande intensidade luminosa.

LED	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Baixo consumo;</li> <li>- Pequena dimensão;</li> <li>- Grande tempo de vida;</li> <li>- Maior flexibilidade de aplicação;</li> <li>- Maior estabilidade na iluminação;</li> <li>- Variação de intensidade;</li> <li>- Tempos de atuação muito reduzidos.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Elevado custo;</li> <li>- Sensível ao aquecimento.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Máquinas de inspeção de pequena e média dimensão;</li> <li>- Aplicações que exijam uma grande flexibilidade e estabilidade.</li> </ul>
Halogéneo	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Maior intensidade;</li> <li>- Luz branca com bom nível espectral;</li> <li>- Baixo custo;</li> <li>- Reduzida dimensão.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Aquecimento;</li> <li>- Elevado consumo;</li> <li>- Baixa durabilidade;</li> <li>- Frágil.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Máquinas de inspeção de pequena e média dimensão;</li> <li>- Aplicações de microscopia.</li> </ul>
Xénon	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Baixo consumo;</li> <li>- Durabilidade;</li> <li>- Funcionamento no espectro do ultravioleta.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Elevado custo;</li> <li>- Instabilidade na intensidade.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Aplicações que exijam uma fonte de luz muito brilhante e estroboscópica;</li> <li>- Aplicações de grandes dimensões;</li> <li>- Aplicações de microscopia.</li> </ul>
Mercúrio	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Apresenta picos muito discretos no comprimento de onda.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Mercúrio é um metal pesado e prejudicial para a saúde.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Microscopia e estudos de fluorescência;</li> <li>- Aplicações de grandes dimensões.</li> </ul>

## Técnicas de Iluminação

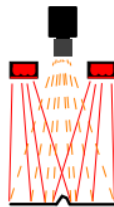
O processo de iluminação num sistema de visão artificial não se limita ao tipo de iluminação usada, mas também à sua configuração geométrica e forma como é aplicada ou posicionada relativamente à câmara e objeto.

A iluminação deve ser projetada atendendo a diversos fatores e circunstâncias de modo a termos um sistema fiável e que evidencie ou dissimule um ou mais aspetos do objeto a inspecionar. Até mesmo a iluminação natural pode ser utilizada num sistema automático de

inspeção baseado em visão, no entanto devido à sua baixa fiabilidade e imprevisibilidade muito raramente é considerada para um sistema deste género.

### **Iluminação Direta**

Na iluminação direta (ou frontal), Figura 4, o objeto é diretamente iluminado através de pontos de luz ou painéis de iluminação fornecendo uma iluminação concentrada. O facto de a luz ser aplicada diretamente no objeto muitas vezes cria sombras distintas. Este tipo de iluminação é utilizado normalmente em objetos que exijam alto contraste, causando por vezes reflexões especulares quando os objetos em causa são brilhantes ou refletores [10] [11] [12].

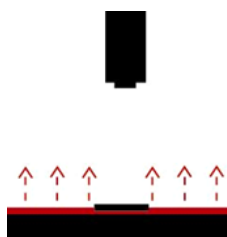


*Figura 4 - Iluminação direta [12].*

### **Iluminação de Fundo ou *Back-light***

Iluminação de Fundo ou *Back-light* (Figura 5) é um tipo de iluminação colocada atrás do objeto alvo e orientada diretamente para a câmara, aparecendo na câmara apenas a silhueta do objeto. Este é um tipo de iluminação uniforme e difusa com menos intensidade que outros tipos de iluminação.

Este tipo de iluminação é normalmente usada em situações em que o objetivo é realçar contornos, localizar e medir objetos, ou sobressair a estrutura interna de objetos transparentes [10] [11] [12].



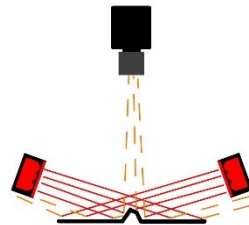
*Figura 5 - Iluminação de fundo ou Back Light [12].*

### **Iluminação *Dark Field***

No tipo de iluminação *Dark Field* (Figura 6), a luz é projetada no objeto através de um ângulo bastante reduzido, reduzindo deste modo reflexos no objeto e sobressaindo a informação que contenha relevos.

A iluminação *Dark Field* pode ser dividida em dois tipos distintos, luz circular e luz direcional. O primeiro tipo é constituído por círculos de luz bastante próximo do objeto de modo a iluminar todo o objeto de forma constante, o segundo tipo é constituído por pelo menos dois focos de luz que apontam diretamente para o objeto.

Este tipo de iluminação é bastante usado em aplicações de microscopia, e será interessante em aplicações onde o objeto tem relevos [10] [11] [12].



*Figura 6 - Iluminação Dark Field [12].*

### **Iluminação Difusa**

A iluminação difusa (Figura 7 e Figura 8) fornece um tipo de iluminação a partir de múltiplas direções, minimizando deste modo sombreamentos no objeto. Este tipo de iluminação é bastante eficaz quando o objetivo é destacar características angulares ou texturas dos objetos sendo utilizada sobretudo em casos em que os objetos são muito refletivos. Tipicamente este tipo de iluminação requer alguma proximidade do objeto a iluminar [10] [11] [12].

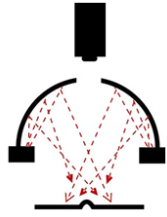


Figura 7 - Iluminação difusa em cúpula [12].

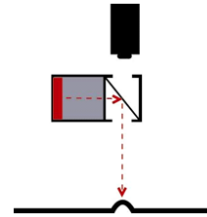


Figura 8 - Iluminação difusa axial [12].

### Iluminação direcional (ou lateral)

A Iluminação direcional (Figura 9 e Figura 10) é o tipo de iluminação mais usual em sistemas de visão, o facto de ser direcionada torna-a diferente da iluminação difusa. Este tipo de iluminação gera contrastes no objeto de modo a salientar os detalhes topográficos do mesmo [10] [11] [12].

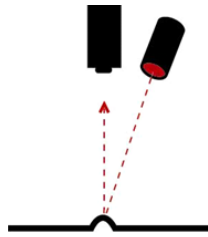


Figura 9 - Iluminação direcional [12].

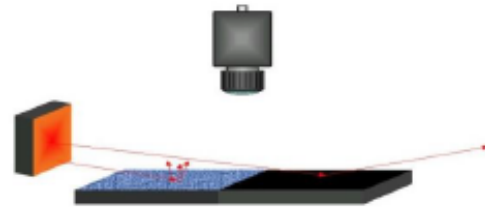


Figura 10 - Iluminação lateral [11].

## 2.1.2. Características das Câmaras e Lentes

---

Neste subcapítulo, são apresentadas características das câmaras e lentes que devem ser consideradas no desenvolvimento de uma aplicação que utilize um sistema de visão.

## Câmaras

Na escolha de uma câmara para um sistema de visão é necessário considerar três fatores muito importantes: o desempenho do sensor, os recursos da câmara (ISO, tempo de exposição, etc.) e a tecnologia de interface e transferência de imagens.

Quanto ao tipo de sensores estes podem ser divididos principalmente em dois grandes tipos: CMOS (*complementary metal-oxide semiconductor*) e CCD (*charge-coupled device*), sendo a sua principal diferença a forma como convertem carga em tensão dentro de cada píxel. Os sensores CCD movem a carga gerada pela luz de píxel para píxel sendo posteriormente convertida em tensão, enquanto os sensores CMOS convertem a carga diretamente dentro de cada píxel [13].

As câmaras usadas em sistemas de visão podem ainda variar de modo geral entre dois tipos câmaras: matricial e linear. No caso de câmaras matriciais o sensor reproduz a informação da área captada produzindo uma imagem 2D no caso de câmaras lineares apenas é captada uma linha de píxeis sendo a segunda dimensão criada pelo movimento dos objetos em relação à câmara [11].

Na escolha da câmara devem ainda ser analisadas outras características tais como, resolução, sensibilidade, tempo de exposição e *frame rate* da câmara, sem esquecer ainda se as câmaras são monocromáticas ou a cores.

Quanto ao tipo de interface existem diversos tipos, e devem ser tidas em conta diversas características como velocidade de transmissão, comprimento máximo do cabo e o número máximo de dispositivos conectados. As características de alguns tipos de interface podem ser analisadas na Tabela 2. Algumas das características apresentadas podem variar conforme a qualidade e comprimento do cabo, nomeadamente a velocidade de transmissão. O número máximo de dispositivos refere-se à quantidade de dispositivos que podem ser conectados ao mesmo através deste tipo de tecnologia. Outra característica apresentada na Tabela 2 é a necessidade de usar uma interface que faça a troca de informação entre a câmara e o computador.

Tabela 2 - Características de interfaces de câmaras [14] [15].

Tecnologia	Velocidade Transmissão Admissível	Comprimento Máximo do Cabo	Nº Max. Dispositivos	Necessidade de Interface
FireWire IEEE 1394b	100 MB/s	100 m (CAT 5)	63	Não
USB 2.0	50 MB/s	5 m	127	Não
USB 3.0	350 MB/s	5 m	127	Não
Giga Ethernet	1000 MB/s	100 m (CAT 5)	Ilimitado	Não
CameraLink	1800 MB/s	10 m	4	Sim

## Lentes

Relativamente à escolha da lente a usar existem duas principais características a ter em conta, a abertura máxima e a distância focal. A abertura máxima limita a intensidade de luz que entra na câmara afetando desde modo a velocidade do obturador e a profundidade de campo, medida de distância entre o ponto mais afastado e o ponto mais próximo entre a qual o objeto está focado. A profundidade de campo é inversamente proporcional à abertura, ou seja quanto maior a abertura menor será a profundidade de campo.

A distância focal é regra geral medida em mm e representa a distância entre o centro ótico da lente e o plano de foco, sendo este um parâmetro importante para calcular o campo de visão (FOV, do inglês *Field Of View*). Este valor poderá ser importante para o cálculo do tamanho de painéis de iluminação no caso de iluminação do tipo *back-light*.

O campo de visão é a área que uma câmara pode observar, variando consoante a lente usada, como indicado anteriormente. Uma lente com maior distância focal faz com que o objeto que se pretende observar aparente estar mais próximo, em contrapartida faz com que se tenha uma menor área captada, tal como mostra a Figura 11.

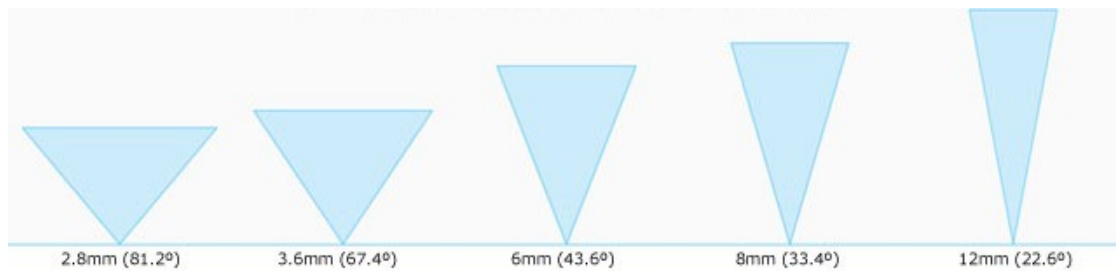


Figura 11 - Ângulo de abertura para várias lentes em câmaras com sensor de 1/3".

### 2.1.3. Ferramentas de desenvolvimento de Sistemas de Visão

---

Atualmente no mercado existem diversas soluções no que se refere a ferramentas para o desenvolvimento de sistemas de visão artificial sendo importante saber as reais necessidades em termos de complexidade que vão ser exigidas, de forma a escolher a ferramenta que melhor se adapte.

No caso de um sistema com menor grau de complexidade a solução poderá mesmo passar pelo uso de câmaras inteligente que dispõem só por si de uma interface programável. Estas podem ser uma boa solução para aplicações de identificação e rastreamento de peças ou reconhecimento de texturas. No entanto as câmaras inteligentes funcionam como solução autónoma mostrando geralmente pouca flexibilidade no desenvolvimento de aplicações.

Existem *softwares* de visão (ferramentas de desenvolvimento), que disponibilizam um conjunto de ferramentas pré desenvolvidas e que podem ser programados através de interfaces gráficas (GUI *Graphical User Interface*). Geralmente este tipo de *software* é fácil de utilizar, mas também pode não oferecer as ferramentas necessárias para construir um sistema robusto para a solução pretendida. Estes tipos de *software* podem ser aplicados em sistemas de alinhamento, medida e inspeção. Como exemplos de *software* deste género temos o Sherlock da Teledyne Dalsa ou o Vision Builder AI da National Instruments.

No que diz respeito a *softwares* onde seja necessária programação em código (texto) através de bibliotecas de visão é possível utilizar o Halcon da empresa MVTec, o Vision Development Module da National Instruments ou o OpenCV (Open Source Computer Vision) que é uma biblioteca *open source*. Estas bibliotecas podem ser utilizadas recorrendo

a um IDE (*Integrated Development Environment*) de desenvolvimento. No caso do Halcon é possível usar o HDevelop como IDE, e no Vision Development Module o LabVIEW, no caso do OpenCV é possível utilizar, por exemplo, o QtCreator ou o Visual Studio [16][17].

Estas bibliotecas contêm centenas de funções que podem ser utilizadas pelo programador e que permitem criar aplicações de visão industrial complexas e com grande grau de flexibilidade. Podem ser aplicadas na identificação de objetos, sistemas de reconhecimento fácil, robôs móveis, reconstrução 3D e num inúmero de aplicações complexas. No entanto a única das soluções apresentadas que é livre de custos tanto a nível académico como industrial é o OpenCV.

Um fator a ter em conta na escolha do *software* a utilizar é o preço do mesmo, onde mais complexidade, envolve normalmente mais custos, embora permita um menor tempo de desenvolvimento.

## 2.2. A Visão Artificial na Indústria

---

De um modo geral um sistema de visão artificial pode ser aplicado na área industrial num diverso número de aplicações como, por exemplo, em equipamentos de controlo de qualidade, na movimentação e orientação de veículos ou na deteção e localização de objetos [18] [19].

No que respeita à inspeção e controlo de qualidade a visão artificial pode entrar em qualquer tipo de indústria de produção, desde a produção de tecidos [20], à inspeção de placas de circuito impresso [21], medição do tamanho de pedras [22], inspeção da qualidade de pneus [23] ou de loiças [24], entre outros.

No caso da indústria alimentar, a visão artificial pode ser usada entre outras soluções em máquinas de rotulagem de modo a identificar a localização específica onde o rótulo deve ser aplicado, ou na inspeção da sua aplicação [25] [26]. A visão artificial pode ainda ser aplicada na verificação do sobre-enchimento ou sub-enchimento de garrafas (Figura 12), ou ainda na calibração de frutas e vegetais bem como na sua inspeção [25] [27] [28].



Figura 12 - Inspeção no enchimento de garrafas [25].

No caso particular da indústria vidreira, os sistemas de inspeção por visão vieram substituir a visão humana nesta função de inspecionar a qualidade das garrafas produzidas, diminuindo os custos com mão-de-obra e aumentando os padrões de qualidade na inspeção. A inspeção das garrafas é efetuada ao seu gargalo, corpo e fundo, bem como à espessura do vidro. Estes sistemas de inspeção não servem apenas para rejeitar artigos defeituosos, fornecem também dados estatísticos que podem ser usados na melhoria dos processos de produção. Algumas destas máquinas de inspeção já começam a apresentar a capacidade de classificar as garrafas de modo a separar dois tipos diferentes de garrafas que possam transitar na mesma linha de inspeção [7] [29] [30] [31] [32].

Atualmente o mercado das máquinas de inspeção é bastante competitivo existido diversas empresas e equipamentos nesta área. A empresa Francesa IRIS apresenta equipamentos de inspeção visual como, por exemplo, o modelo Evolution 12. Combinando as suas doze câmaras e *software* de inspeção este equipamento é concebido para inspecionar em 360°, todo o corpo da garrafa [8]. A empresa Americana Emhart Glass apresenta outras soluções de inspeção visual, como é o caso da Flex BC. Este é um equipamento concebido para inspecionar qualquer embalagem de vidro. A iluminação neste equipamento é feita através de painéis de iluminação (patenteados pela própria), usando LEDs super brilhantes. Este equipamento possui 12 câmaras com uma resolução de 1396 x 1024 píxeis [9].

Os sistemas de alinhamento de garrafas são outro tipo de equipamentos que começam a aparecer também na indústria vidreira, devido à maior exigência dos clientes e a existência de garrafas de formato “não regular”. Estas criam a necessidade de que as mesmas sejam orientadas num ângulo específico para que no processo de paletização fiquem todos posicionados de forma idêntica.

## 2.3. Sistemas de Alinhamento Existentes no Mercado

---

A procura por flexibilidade e a necessidade que as vidreiras têm para lidar com garrafas de forma “não regular” (artigos não circulares), leva a que no mercado já existam alguns equipamentos de alinhamento de garrafas desenvolvidos por fabricantes de máquinas industriais.

Relativamente a sistemas de alinhamento existente no mercado a informação técnica ou científica acerca deste tipo de equipamentos é relativamente escassa, sendo apenas possível encontrar breves descrições nos *websites* das empresas que os comercializam.

O alinhador mecânico desenvolvido pela empresa ICEBEL, é um equipamento simples sem qualquer tipo de sistema de visão, constituído apenas por duas correias. O alinhamento das garrafas é conseguido através da diferença de velocidade entre cada uma das correias, e só é possível em garrafas em que exista uma diferença de tamanho considerável entre pelo menos duas faces da garrafa. A garrafa ao encostar nas duas correias é obrigada a rodar devido à diferença de velocidade entre correias, deixando de rodar assim que ganhe folga. Este é um equipamento pouco preciso na orientação de garrafas, não alinhando todas as garrafas com a mesma precisão, principalmente se as garrafas apresentarem faces arredondadas. Outra desvantagem deste sistema é a impossibilidade de deteção de gravuras nas faces das garrafas devido a não possuir um sistema de visão.

O Orientador de Garrafas desenvolvido pela empresa Glass Soft (Figura 13), empresa situada na Marinha Grande, foi concebido de modo a orientar especificamente garrafas que possuam uma superfície côncava e uma superfície convexa. Este equipamento possui várias câmaras, um PLC (*programmable logic controller*) industrial, uma HMI (*human machine interface*), sendo ainda possível a rejeição de artigos que não sejam corretamente orientados à saída do equipamento [33].



Figura 13 - Orientador de Garrafas desenvolvido pela empresa Glass Soft [33].

Também com o mesmo objetivo a empresa alemã MSK Covertech desenvolveu a estação de alinhamento de garrafas (“*bottle alignment station*”). Este é um sistema *plug and play* de fácil instalação, sendo possível deste modo alterar o seu local de funcionamento entre várias linhas de inspeção e transporte de garrafas. Todas as parametrizações são feitas através uma HMI, facilitando a mudança de artigos em produção [34].

O orientador FLEXITURN da empresa Espanhola E2M (Figura 14) [35] é outro equipamento com capacidade de orientar vários tipos de garrafas. A deteção da orientação da garrafa é calculada através da forma da garrafa ou através de gravações e texturas existentes nas garrafas.



Figura 14 - Orientador FLEXITURN desenvolvido pela empresa E2M [35].

O sistema de iluminação do orientador FLEXITURN é composto por dois painéis de iluminação posicionados paralelamente em cada um dos lados do tapete que transporta as garrafas. Cada painel de iluminação é composto por uma tira horizontal de 26 LEDs Cree no topo do painel, uma superfície difusora e um vidro na frente do difusor. O sistema de

aquisição é composto por duas câmaras monocromáticas de 1,3 Megapixéis cada. Uma das câmaras é posicionada na lateral de forma a observar o corpo da garrafa e outra no cimo da estrutura de forma a observar o seu formato. A câmara lateral possui uma lente de 8 mm e a câmara no topo uma lente de 25 mm [36]. Este é um equipamento compacto e autónomo, podendo funcionar em linhas com produções até 650 garrafas por minuto. Tal como nos equipamentos anteriores possui uma HMI de modo a facilitar a parametrização do equipamento [35].



## 3. Desenvolvimento da Estrutura

---

Neste capítulo irá ser descrita a estrutura do sistema desenvolvido para alinhar garrafas numa linha de transporte de garrafas de vidro.

Realizado o estudo anterior, procurou-se desenvolver um sistema para alinhar garrafas com um custo mais baixo. Para tal, começou-se por desenvolver a estrutura e suportes, o sistema de iluminação, a escolhas das câmaras e lentes, e o seu posicionamento. Esta estrutura não contemplou a rotação em si, focando-se no sistema necessário para a deteção do ângulo de rotação a aplicar.

### 3.1. Configuração do Sistema

---

Na Figura 15 encontra-se um diagrama considerando uma vista de topo do sistema desenvolvido, e na Figura 16 o aspeto final do sistema. O sistema de visão é composto por duas câmaras, uma câmara no topo (Figura 15, legenda 1) e Figura 16, legenda c)) de modo a captar a forma da garrafa e uma câmara frontal (Figura 15, legenda 2) e Figura 16, legenda b)) para verificar a existência de relevos no corpo da garrafa. A deteção de passagem de garrafas é feita por uma fotocélula na entrada da estrutura e posicionada à altura do gargalo da garrafa (Figura 15, legenda 4) e Figura 16, legenda e)). A fotocélula tem que ficar à altura do gargalo para detetar todas as garrafas no mesmo ponto, independentemente da sua orientação.

O sistema iluminação é composto por dois painéis de LEDs laterais posicionados paralelamente ao transportador (Figura 15, legenda 3) e Figura 16, legenda a)).

Toda a estrutura irá encaixar sobre um transportador (Figura 15, legenda 5) e Figura 16, legenda d)) por onde circulam as garrafas. Ao logo deste capítulo serão apresentadas as razões que levaram a esta configuração.

- 1) Câmara de topo;
- 2) Câmara lateral;
- 3) Painéis de Leds;
- 4) Fotocélula com refletor;
- 5) Transportador;
- 6) Garrafa;

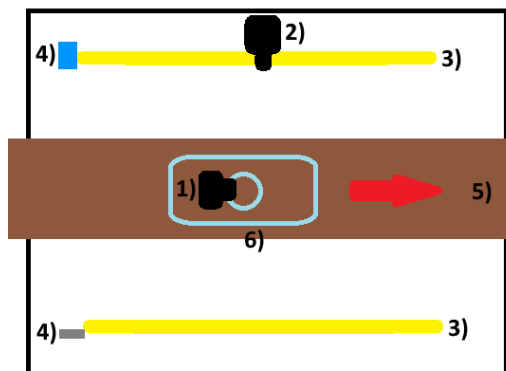


Figura 15 - Arquitetura final do sistema de visão proposto (vista de topo).

- a) Painéis de Iluminação;
- b) Câmara IDS;
- c) Câmara PS3 Eye;
- d) Transportador
- e) Fotocélula e espelho;

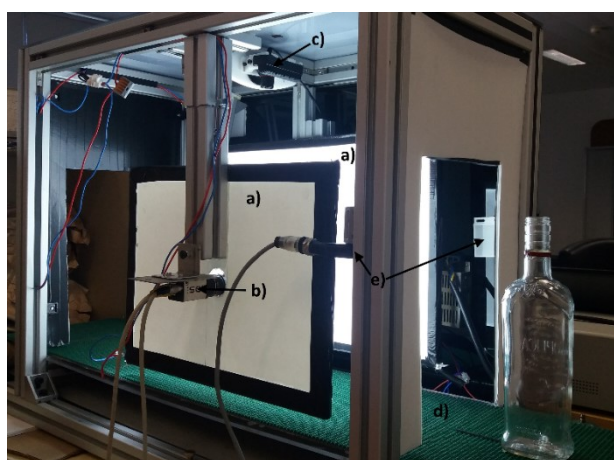


Figura 16 - Estrutura final do projeto.

Após a obtenção do ângulo de orientação da garrafa será necessário atuar sobre ela, de modo a realinha-la para a posição desejada. No entanto o projeto apenas incide sobre a parte da obtenção da orientação da garrafa. Num protótipo completamente funcional estes sistemas teriam que ser integrados. Um sistema mecânico de alinhamento típico é composto por duas correias que agarrem a garrafa pelo gargalo. O alinhamento da garrafa é feito aplicado uma diferença de velocidade entre as duas correias, tendo em atenção que na fase de entrada e de saída da garrafa as correias devem ter a mesma velocidade do tapete de transporte.

## **3.2. Sistema de Aquisição – Câmaras e Lentes**

---

Tal como descrito anteriormente, a arquitetura proposta para o sistema contempla duas câmaras: uma de topo e outra frontal.

A necessidade de uma câmara lateral deve-se ao facto de, quando se analisa garrafas simétricas (mas não circulares) através da câmara de topo, se obter um resultado com possibilidade de erro de 180° (ou eventualmente outros ângulos para garrafas com outros tipos de simetria), dado que através da câmara de topo não se consegue detetar rugosidades nas laterais da garrafa. No caso de a garrafa não conter qualquer diferenciação nas laterais da garrafa será irrelevante a diferenciação entre as duas possíveis soluções dadas pela câmara de topo, pelo que a câmara lateral é desnecessária nesses casos.

Inicialmente colocou-se a hipótese de utilizar uma câmara inteligente da Dalsa (BOA), no entanto esta integração não foi possível de executar visto não existir um SDK que permita integrar a câmara no projeto.

Tal como os restantes materiais utilizados no projeto, as câmaras e lentes são material que estava disponível no laboratório de Robótica. Apensar disso revelaram-se adequadas para a realização do projeto proposto.

### **3.2.1. Câmara IDS – uEye UI-5240CP-C-HQ**

---

A câmara uEye da IDS (Figura 17) foi a primeira a ser testada e utilizada, tendo sido com ela que foram realizados a maioria dos testes. As características apresentadas por esta câmara mostraram ser adequadas às exigências do projeto. Na Tabela 3 são apresentadas algumas características da câmara uEye UI-5240CP-C-HQ.



Figura 17 - Câmara IDS - uEye UI-5240CP-C-HQ.

Tabela 3 - Especificações da câmara uEye UI-5240CP-C-HQ.

Especificações	
Tipo Sensor	CMOS a cores
Resolução	1280 x 1024 Píxeis
Frame rate	50 fps (48 fps em modo <i>trigger</i> )
Tempo de exposição	0.009 ms - 2000 ms
Montagem da lente ( <i>Lens Mount</i> )	C-Mount
Interface	GigE RJ45
Alimentação	12V – 24V (ou PoE)

A possibilidade de ser ligado um *trigger* externo à câmara uEye é uma mais-valia no desenvolvimento do projeto, permitindo a instalação de uma fotocélula à entrada no equipamento que provoque a captura das imagens por parte das câmaras, ao ser detetada a presença de uma garrafa.

Para poder começar a trabalhar com a câmara da IDS foi necessário instalar os drivers e *softwares* relativos à câmara (IDS Software Suite para *Windows*). Como a câmara utilizada usa o protocolo de comunicação GigE foi necessário atribuir um IP fixo através do *software* IDS Camera Manager (da mesma gama do computador usado) de modo a ser possível ligar à câmara, tal como mostra a Figura 18. Posto isto já é possível capturar imagens para testes através da câmara recorrendo ao *software* uEye Cockpit [37].



Figura 18 - Software de configuração IDS Camera Manager.

Para esta câmara foi utilizada uma lente CCTV de 6mm.

Esta foi a câmara inicialmente escolhida para ficar instalada no topo do equipamento, tendo sido posteriormente trocado o seu posicionamento com a câmara que estava instalada na parte lateral do equipamento. Esta alteração aconteceu devido às especificações técnicas da *webcam* utilizada, tal como descrito no subcapítulo 3.2.2.

### 3.2.2. **Webcam - Sony PS3 Eye**

---

Dentro das opções disponíveis, a solução que melhor satisfaz as necessidades do projeto foi a *webcam* da PlayStation 3 (PS3 Eye), Figura 19, nomeadamente por possibilidade a captura com uma *frame rate* elevada. Na Tabela 4 estão expostas algumas das características da *webcam*.



Figura 19 - Câmera da Playstation 3 PS3 Eye.

Especificações	
Resolução / <i>Frame rate</i>	640 x 480 / 60 fps
	320 x 240 / 120 fps
Abertura da lente	2.1 F-stop
Distância focal	25 cm fixo
Interface	USB 2
Alimentação	DC 5V (por USB)

Tabela 4 - Especificações da webcam PS3 Eye.

Para integrar esta *webcam* no projeto foi necessário executar alguns passos que estão descritos no **Anexo 4**.

Inicialmente estava previsto a *webcam* ser posicionada lateralmente, mas devido à distância de focagem mínima ser de 25cm, a imagem captada pela câmera não tinha o detalhe necessário (Figura 20, à direita imagem original captada pela câmera, à esquerda imagem resultado após aplicação de um filtro de detecção de arestas) [38].

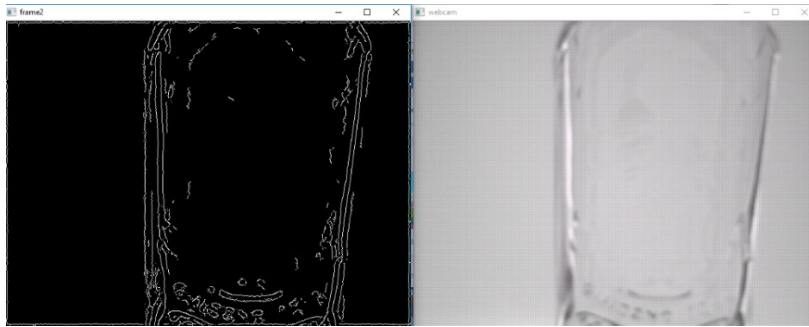


Figura 20 - Imagem captada pela webcam na posição lateral.

Devido a este facto as duas câmaras trocaram de posição entre si, a câmara da IDS ficou posicionada lateralmente e a *webcam* da Sony PS3 Eye posicionada no topo da estrutura

### 3.3. Iluminação

---

A escolha do sistema de iluminação é muito relevante e específica para a aplicação em causa, sendo o objetivo o de determinar a orientação de garrafas simétricas não circulares em movimento num tapete transportador.

Durante o projeto optou-se não pela aquisição de painéis comercialmente disponíveis, mas sim pelo desenvolvimento dos sistemas de iluminação, de forma a aprofundar o conhecimento e reduzir os custos de desenvolvimento.

A necessidade de o sistema proposto possuir duas câmaras em posições distintas, uma no topo e outra frontal, e a existência de um transportador que atravessa toda a estrutura, de modo a transportar as garrafas, reduz as possibilidades quanto aos métodos de iluminação utilizados, devendo também existir um compromisso entre o posicionamento das duas câmaras e a forma como o objeto é iluminado.

O objetivo foi criar uma superfície de iluminação uniforme para a captação de imagens pela câmara frontal, salientando assim os relevos laterais da garrafa.

Foi selecionada uma lente de 6mm e sabendo que as câmaras existentes contêm sensores CCD com 1/3'', foi calculado o tamanho necessário do painel com base no campo de visão da lente (*FOV*) e o tamanho máximo de uma garrafa que foi definido para este

sistema (Figura 21). As dimensões a que se chegou através dos cálculos foram de 405 x 305 mm, estes cálculos podem ser encontrados no **Anexo 1**.

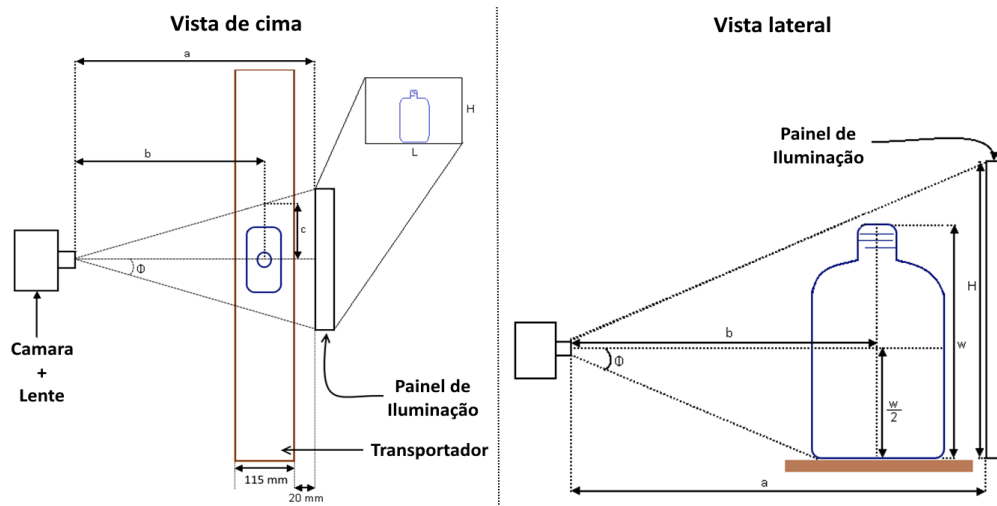


Figura 21 - Esquema para Cálculo das dimensões do painel de iluminação.

### 3.3.1. Desenvolvimento dos Painéis de Iluminação

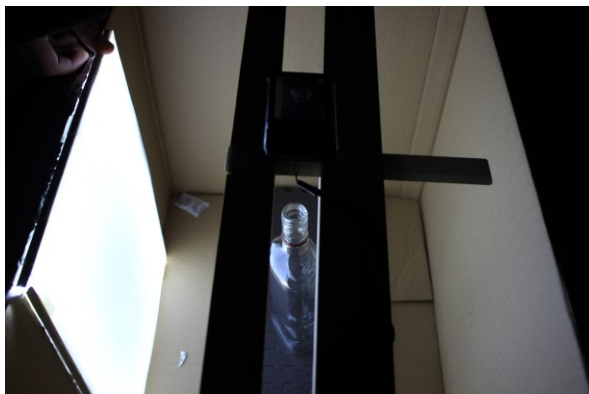
---

Após o cálculo das dimensões foi produzido um painel de iluminação utilizando uma placa em acrílico transparente com as dimensões calculadas, tendo sido posteriormente maquinado em toda a sua superfície plana de modo a criar micro frisos de forma uniforme. Em todo o perímetro do painel foi colada uma fita de LEDs, de modo a que a luz que atravessa o painel seja refletida pela sua superfície ao encontrar cada um dos frisos criados na superfície do painel, sem estes frisos a luz atravessaria o painel sem ser refletida lateralmente (Figura 22).



Figura 22 - Perfil do painel de iluminação com frisos.

Na fase de desenvolvimento do sistema de iluminação, foi desenvolvida uma estrutura provisória para testes do mesmo. Foi obtido um conjunto de imagens e feita uma análise comparativa. As imagens foram todas captadas de topo, tal como exemplificado na Figura 23.



*Figura 23 - Estrutura de testes iniciais.*

Foram efetuados testes com várias configurações de painéis com a dimensão indicada anteriormente de forma a apurar qual a melhor configuração para se obter uma boa iluminação.

Nas configurações testadas foram usados diversos materiais em conjunto com o painel de acrílico, entre os quais película de alumínio, cartolina e papel autocolante brancos, por detrás do painel e ainda folhas de papel vegetal na frente do painel de modo a analisar a reflexão e uniformidade da iluminação do painel.

Nestes testes iniciais foi notório que apenas um painel de iluminação era insuficiente para iluminar de forma homogénea a garrafa, tal como é possível observa na Figura 24, onde só o lado da garrafa que está virado para o painel está iluminado e se destaca facilmente do transportador por baixo.

Estas circunstâncias expressam a necessidade de existir um segundo painel de iluminação de modo a que a iluminação seja mais uniforme.

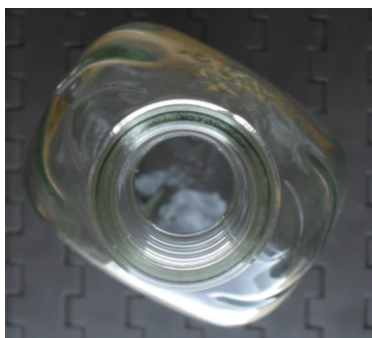


Figura 24 - Teste inicial com um painel de iluminação.

Durante os testes realizados com imagens de topo, o painel inicial foi rodado de modo a ficar com maior superfície horizontal, em detrimento da capacidade de trabalhar com garrafas de maiores dimensões. Com esta experiência verificou-se que as superfícies laterais da garrafa ficaram com maior realce. Quanto mais largo o painel, mais iluminada fica a garrafa.

Considerou-se para o sistema uma estrutura já existente no Laboratório de robótica com as dimensões de 760mm x 340mm, por ser adequado. Fez-se o segundo painel para aproveitar toda a extensão do topo da estrutura.

Na Tabela 5 são apresentadas as dimensões dos painéis de iluminação usados.

Tabela 5 - Dimensões dos painéis de iluminação (Largura x Altura x Espessura).

Painel 1 – Acrílico frisado	Medidas – 405 x 305 x 8 mm
Painel 2 – Acrílico fosco	Medidas – 515 x 375 x 8 mm
<i>K-Line</i>	Medidas – Do tamanho do painel, 3mm espessura

Para o segundo painel de iluminação foram efetuados novamente vários testes, mas desta vez as imagens foram captadas de frente para a superfície do painel e corpo da garrafa.

A primeira conclusão retirada foi de que acrílico transparente com frisos não tinha uma iluminação uniforme no centro. Através da Figura 25 é possível verificar que o nível de iluminação é muito mais intenso nas laterais junto aos LEDs do que no centro do painel.

Ao juntar estas conclusões ao custo extra que envolve maquinar o painel de acrílico, conclui-se que se deveria analisar outras soluções para o painel de iluminação.



*Figura 25 - Imagem captada de frente para o painel de iluminação com frisos.*

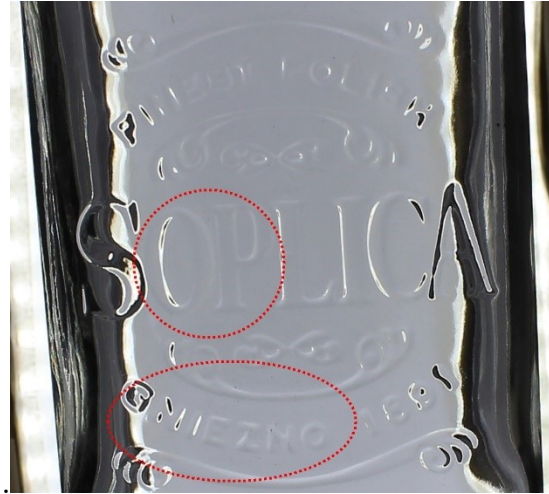
Tal como para o primeiro painel, foram usados novamente diferentes materiais e configurações de modo a ter um painel de luz difusa, onde a luz seja projetada em várias direções, aumentando a uniformidade da reflexão por toda a superfície da garrafa.

Foram adquiridas várias amostras de acrílicos, sendo que de todos os ensaios efetuados o acrílico fosco em conjunto com uma superfície refletora por detrás revelou ser a melhor opção. O acrílico usado possui duas superfícies distintas juntando a capacidade difusora da superfície baça, ao mesmo tempo que a sua superfície lisa deixa a luz atravessar.

Como o acrílico escolhido para o painel de iluminação possui uma face fosca (baça) e outra lisa, houve a necessidade de testar se seria relevante a escolha da face que ficaria virada para a garrafa. Através da Figura 26 e Figura 27 foi possível verificar que com a face lisa virada para o objeto, o logotipo presente na garrafa de amostra fica mais nítido (Figura 26), estando sinalizado nas Figura 26 e Figura 27 as zonas onde essas diferenças são mais notórias. Esta verificação foi mais um aspeto determinante na escolha da configuração final do painel de iluminação.



*Figura 26 - Foto captada com a parte lisa do acrílico virada para a frente.*



*Figura 27 - Foto captada com a parte lisa do acrílico virada para trás.*

A determinada altura dos ensaios realizados foi testada se a utilização de um filtro polarizador na lente da câmara traria benefícios na captação da imagem. Foram captadas duas imagens primeiro sem filtro (Figura 28) e depois com filtro (Figura 29), mas adaptando a velocidade do obturador da câmara de modo a que a luminosidade de entrada fosse idêntica em ambas as situações. Analisando as imagens captadas (Figura 28 e Figura 29) foi possível perceber que a utilização deste filtro não traria mais-valias neste caso específico.



*Figura 28 - Imagem captada sem filtro polarizador (shutter 1/200).*



*Figura 29 - Imagem captada com filtro polarizador (shutter 1/80).*

Após terem sido efetuados uma série de testes utilizando vários tipos de acrílicos e configurações chegou-se a um formato semelhante ao descrito na Figura 30. A configuração considerada é composta por um acrílico fosco, com a parte lisa para a frente e LEDs em toda a sua volta. Para colocar por detrás do acrílico optou-se por uma placa de *K-Line* branca, por ser um material fácil de manusear e bastante refletor ajudando à uniformização da iluminação.

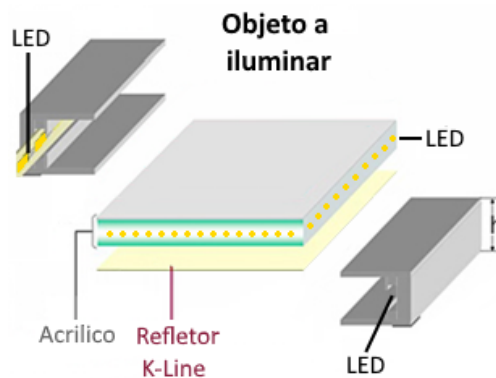


Figura 30 - Configuração do painel de Iluminação.

Após a instalação dos dois painéis de iluminação na estrutura foram testadas varias disposições dos dois painéis em simultâneo. Verificou-se que mesmo assim havia um déficit de iluminação nas laterais da garrafa que não ficavam viradas diretamente para os painéis de iluminação, tal como se pode verificar na Figura 31.

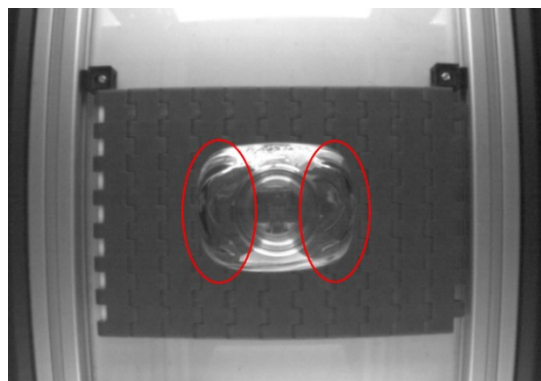


Figura 31 - Défice de iluminação com dois painéis.

Posto isto decidiu-se que seria mais vantajoso alterar a disposição interna da estrutura, de modo a colocar os painéis mais próximos da garrafa, rodando todo o sistema 90°. Desta forma os painéis de iluminação ficaram dispostos paralelamente aos lados maiores da estrutura. Esta alteração revelou ser vantajosa relativamente à iluminação da garrafa reduzindo as áreas mal iluminadas, no entanto não resolveu a totalidade do problema.

Após testar várias possíveis configurações e posições dos painéis de iluminação decidiu-se substituir os LEDs existentes por outros com maior intensidade. Tal como nos LEDs usados inicialmente optou-se novamente por LEDs brancos, com base no que foi visto no subcapítulo 2.1.1 e Figura 3, esta é uma boa solução para detetar rugosidades em objetos o que é importante neste projeto.

Como solução para a iluminação foi neste caso usado uma fita de LEDs brancos de alta intensidade (*SMD 3014 White LED*), com 18W/m, uma temperatura de cor de 6000K e com 204 LEDs/m.

Após a troca dos LEDs verificou-se que mais luz só por si não significa uma melhor iluminação da garrafa, no entanto podemos ter uma velocidade do *shutter* mais rápida pois não necessita de estar tanto tempo aberto para captar a imagem, o que é importante nesta aplicação.

Após a troca dos LEDs os dois painéis de iluminação foram instalados na estrutura de modo a poderem deslizar e aproximarem-se ou afastarem-se do transportador obtendo-se assim um sistema de iluminação do tipo direcional (ou lateral), configurável. Após estarem fixados testou-se a aquisição de imagens com estes mais próximos ou afastados bem como mais altos ou mais baixos na estrutura (Figura 32 a Figura 35), chegando à melhor solução que está apresentada na Figura 35 e Figura 36, com os painéis o mais alto possível e à face com ao transportador. Nas Figura 32 a Figura 35 as imagens mais à esquerda correspondem à imagem captada, as imagens do meio correspondem à imagem binarizada (*threshold*) e a imagem mais à direita corresponde à imagem binarizada com a aplicação da operação de *erode* e de *dilate*.

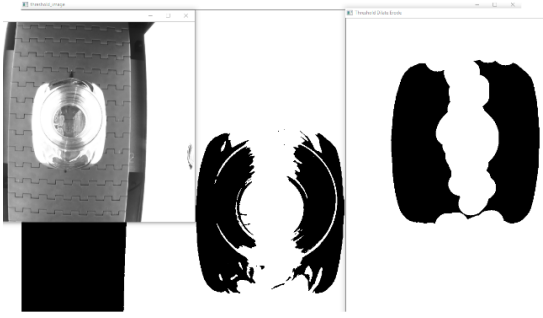


Figura 32 - Painéis afastados e em baixo.

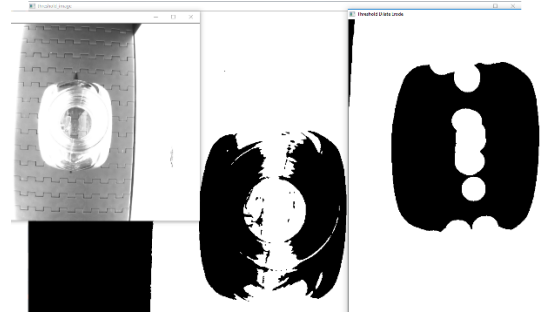


Figura 34 - Painéis próximos e em baixo.

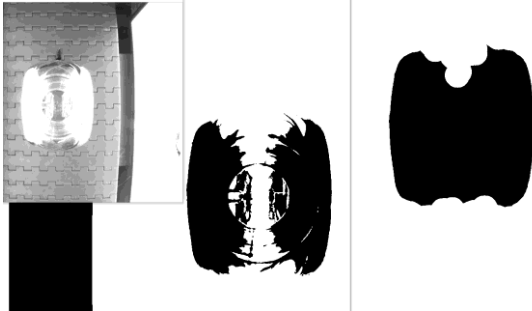


Figura 33 - Painéis afastados e elevados.

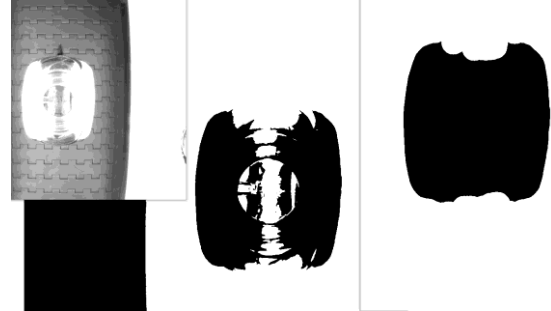


Figura 35 - Painéis próximos e elevados.



Figura 36 - Estrutura final com os painéis próximos do transportador e altos.

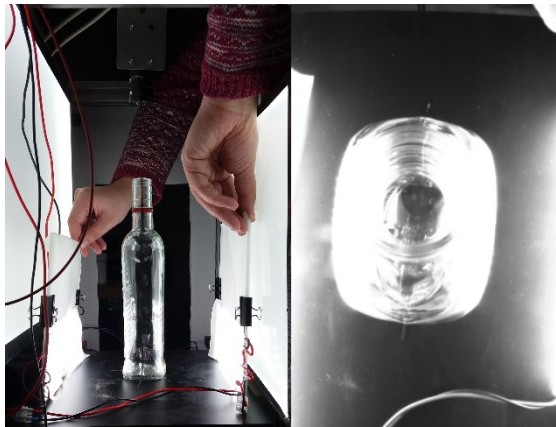
### 3.3.2. Testes Adicionais

---

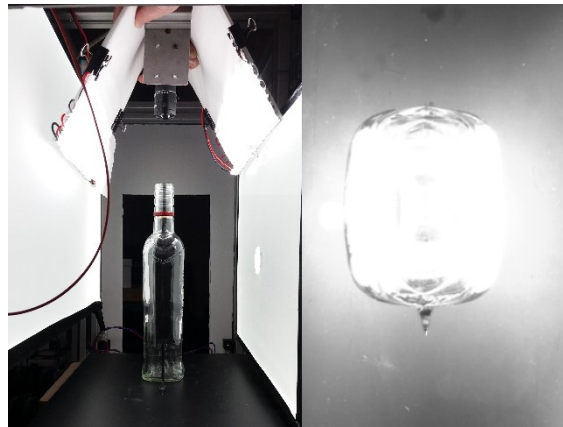
#### Posicionamento dos Painéis

A melhoria da iluminação poderia significar um algoritmo de processamento mais simples e mais rápido, pelo que foram efetuados novos testes recorrendo a dois painéis de iluminação mais pequenos, procurando minimizar a falta de iluminação nos topos da garrafa.

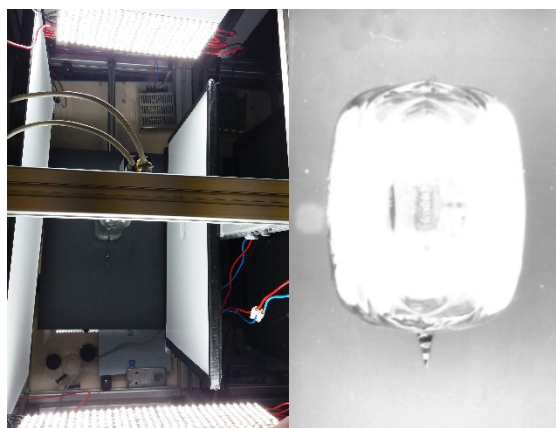
Alguns dos testes efetuados podem ser visualizados da Figura 37 à Figura 40, onde são apresentadas as estruturas testadas e os resultados obtidos com as mesmas. Na Figura 37 testou-se o efeito de se colocar mais iluminação por baixo. Na Figura 38 testou-se colocar mais iluminação por cima de forma direcional às zonas com falta de iluminação. Na Figura 39 colocou-se os painéis iluminação mais pequenos paralelos aos já existentes, de modo a ter iluminação de todas as direções. Por fim na Figura 40 foram colocados os painéis mais pequenos no topo da estrutura a apontar diretamente para baixo para a garrafa.



*Figura 37 - Painéis de LEDs pequeno junto a base da garrafa e respetivo resultado.*



*Figura 38 - Painéis de LEDs pequenos no topo e oblíquos a apontar para o gargalo da garrafa e respetivo resultado*



*Figura 39 - Painéis de LEDs pequenos no topo e na zona de entrada/saída da garrafa e respetivo resultado.*



*Figura 40 - Painéis de LEDs pequenos no topo a apontar para o gargalo da garrafa juntos à câmara e respetivo resultado.*

Como é possível verificar através dos resultados obtidos, no caso de se usar mais iluminação por baixo junto aos painéis já existentes, Figura 37, os topos da garrafa perpendiculares aos painéis continuam por iluminar e nas zonas bem iluminadas começa a existir saturação de luz sendo já de difícil distinção onde começa a garrafa e acaba o transportador. No caso da Figura 38 acaba por acontecer a mesma coisa do teste anterior, havendo ainda uma maior saturação do transportador à volta da garrafa, apesar das zonas mal iluminadas no pescoço da garrafa. Nos casos dos testes das Figura 39 e Figura 40, que se pensava à partida que reduziriam o problema da falta de iluminação nos topos, revelou tal como nos restantes testes uma grande saturação de luz tanto na garrafa como no transportador sendo bastante difícil a distinção entre ambos, além dos topos da garrafa continuarem com défice de iluminação.

A iluminação por cima revelou não ser uma boa aposta dado que a luz ao chegar à garrafa não é refletida na direção da câmara resultando na falta de informação nas imagens captadas.

### **Teste de Iluminação Difusa Tipo Domo (Cúpula)**

Foi ainda testada a técnica de iluminação difusa em domo com recurso a uma cúpula desenvolvida para o efeito (Figura 41). A cúpula é constituída por 42 LEDs e conta com um diâmetro de 90mm. Na Figura 41, à esquerda está a vista da cúpula por baixo e à direita a vista por cima. Neste tipo de iluminação a luz emitida pelos LEDs é refletida pela superfície da cúpula iluminando indirectamente o objecto que se encontra por baixo. Note-se que não houve aqui uma preocupação em ter um sistema de iluminação final, mas apenas de avaliar o potencial deste tipo de iluminação para esta aplicação.



*Figura 41 - Cúpula para iluminação difusa em domo.*

Tal como se pode verificar através dos resultados apresentados na Figura 42, a iluminação do tipo domo não se revelou eficiente porque a luz que provém do domo apenas é refletida para a câmara pelo gargalo da garrafa e não pelas restantes superfícies da garrafa.

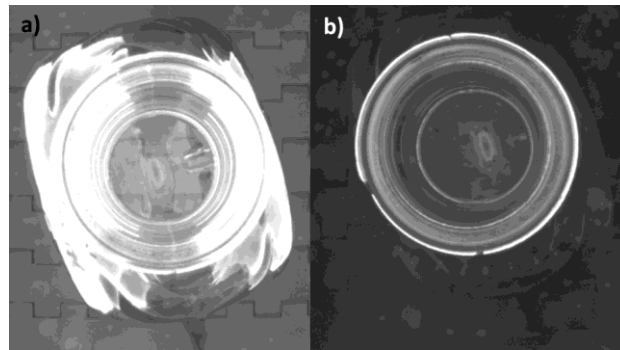


Figura 42 - Resultados retirados da iluminação com cúpula a) Com os painéis laterais ligados, b) com os painéis laterais desligados.

### 3.4. Considerações Finais

---

Ao longo dos testes efetuados com captura de imagens ficou patente que a utilização de dois painéis é a melhor solução para um sistema deste género. No entanto, os painéis devem ter as mesmas dimensões para que se tenha uma iluminação e resultado captado mais uniforme.

A estrutura do equipamento deve ser o mais fechada possível de modo a não existir interferências de luz externa e não comprometer os resultados.

Relativamente às câmaras usadas, se não houver necessidades muito distintas entre ambas, devem ser usadas câmaras da mesma marca e família, para que seja possível usar o mesmo SDK, facilitando deste modo o processo de desenvolvimento do algoritmo do projeto. Deve-se garantir também o *trigger* externo e tempos de aquisição semelhantes.

Apesar de a *webcam* da *playstation* PS3 Eye ser amplamente utilizada em projetos simples de visão artificial é notório que tem menos qualidade de imagem e menor adaptabilidade em termos de focagem do que comparada com a câmara industrial da IDS, servindo, no entanto, para os requisitos necessários apresentados ao longo do projeto. No entanto seria vantajoso ter utilizado uma câmara industrial que tivesse tempos de aquisição

semelhante à câmara da IDS para as imagens serem adquiridas simultaneamente, bem como a possibilidade de ligar um *trigger* externo, de forma a facilitar o início da captura de imagem.



## 4. Desenvolvimento do Algoritmo

---

Importa agora descrever o algoritmo desenvolvido para processamento das imagens adquiridas e deteção da orientação da garrafa.

### 4.1. Ferramentas de Desenvolvimento

---

Neste subcapítulo iram ser abordadas as ferramentas de desenvolvimento utilizadas neste projeto e as explicações sobre as opções tomadas.

Foram realizados alguns testes iniciais com o **Sherlock**, numa perspetiva de obter alguns dados iniciais com uma ferramenta de rápida/fácil utilização. No entanto foi definido logo à partida que deveria utilizar-se um SDK que permitisse uma programação baseada em bibliotecas para ter uma maior flexibilidade na aplicação a desenvolver.

No entanto para aplicações de baixa complexidade esta ferramenta revela-se uma boa solução, apresentado uma interface de programação bastante acessível e uma conexão simples com outras aplicações industriais [16].

Ficou determinado que a melhor solução para desenvolver o projeto seria utilizando a biblioteca **OpenCV**<sup>1</sup>. O OpenCV é uma biblioteca *opensource* tanto para uso académico como comercial, usada no desenvolvimento de aplicações de visão por computador. É possível usar o OpenCV tanto em Windows, Linux e Android podendo ser usadas como linguagens de programação C, C++, Python ou Java.

Para utilizar o OpenCV foi preciso instalar uma ferramenta de desenvolvimento (IDE). Numa primeira fase optou-se por utilizar o **QtCreator** com o MinGw 64bits em ambiente Windows. O MinGw ("*Minimalist GNU for Windows*") é uma versão minimalista do GNU disponível para o desenvolvimento de aplicações em *Windows*, onde se inclui o compilador e bibliotecas base. Esta foi a opção tomada tendo em conta os recursos necessários para a

---

<sup>1</sup> <http://opencv.org/>

instalação desta ferramenta bem como a possibilidade de se poder migrar o código desenvolvido para Linux sem alterações.

Todas as instruções necessárias para utilizar esta solução estão descritas no **Anexo 2**.

A determinada altura do projeto houve a necessidade de utilizar *threads* de modo a otimizar o tempo de execução do código, no entanto estas não são completamente suportadas ainda no MinGW, pelo que se decidiu optar por uma alternativa à utilização do MinGW e QtCreator.

Optou-se assim pela utilização do **Visual Studio** versão Community 2015, e a utilização do Opencv 3.3.0.

As instruções necessárias para a utilização do OpenCV com o Visual Studio estão presentes no **Anexo 4**. Para trabalhar com as câmaras da IDS e PS3 Eye é necessário consultar os respetivos SDK.

## 4.2. Descrição do Algoritmo e Implementação

---

Neste capítulo será descrita em mais detalhe o algoritmo e a implementação das técnicas utilizadas ao longo do desenvolvimento do projeto.

Apesar de existir no algoritmo da câmara de topo a dúvida entre duas posições, com a diferença de  $180^\circ$  entre elas, este algoritmo apenas retorna um valor de ângulo entre  $-90^\circ$  e  $90^\circ$ , e será através do algoritmo desenvolvido para a câmara lateral que esta desambiguação será desfeita. Esta dúvida surge no caso de garrafas simétricas e pelo facto de pela câmara de topo não ser possível distinguir a localização das gravuras na lateral da garrafa.

Na Figura 43 está representado o referencial usado nos algoritmos desenvolvidos, de modo a que seja perceptível ao leitor a real orientação da garrafa ao longo das explicações apresentadas. O valor de ângulo apresentado será entendido sempre como o valor que será necessário rodar de modo a que a garrafa fique alinhada. De forma resumida:

$0^\circ$  - Garrafa posicionada paralela aos painéis de iluminação com a gravura virada de frente para a câmara lateral;

$-90^\circ$  - Garrafa perpendicular aos painéis de iluminação com a gravura virada para a entrada do equipamento;

90° - Garrafa perpendicular aos painéis de iluminação com a gravura virada para a saída do equipamento;

+/-180° - Garrafa posicionada paralela aos painéis de iluminação com a gravura virada para o lado oposto à câmara;

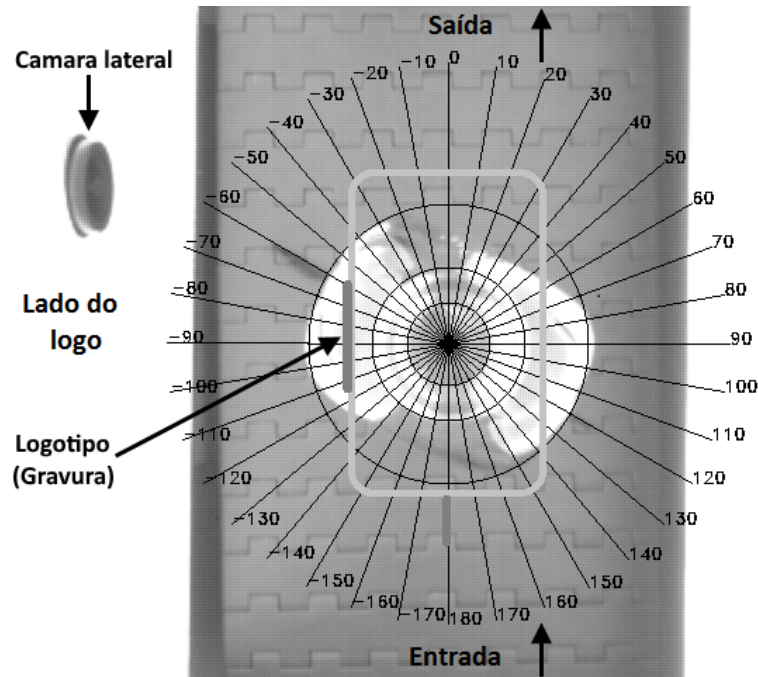


Figura 43 - Referencial usado nos algoritmos desenvolvidos.

Este sistema possui uma arquitetura com um único processo e duas *threads* paralelas, correspondendo cada uma ao procedimento da imagem capturada por cada uma das câmaras. O resultado final depende do resultado de ambas as *threads*.

Após o *trigger* fornecido pela fotocélula de detecção de garrafas, são desbloqueadas as duas *threads*, correndo os algoritmos de tratamento e processamento de imagem de cada câmara. No caso de garrafas simétricas, mas não circulares, o algoritmo de topo retorna dois resultados desfasados 180° graus. O algoritmo associado à câmara lateral vai esclarecer qual das duas hipóteses apresentadas pelo algoritmo da câmara de topo, está correta. Esta circunstância leva à necessidade de a determinada altura o processo da câmara lateral ficar à espera do resultado do processo da câmara de topo.

Na Figura 44 é possível verificar a arquitetura proposta para este sistema.

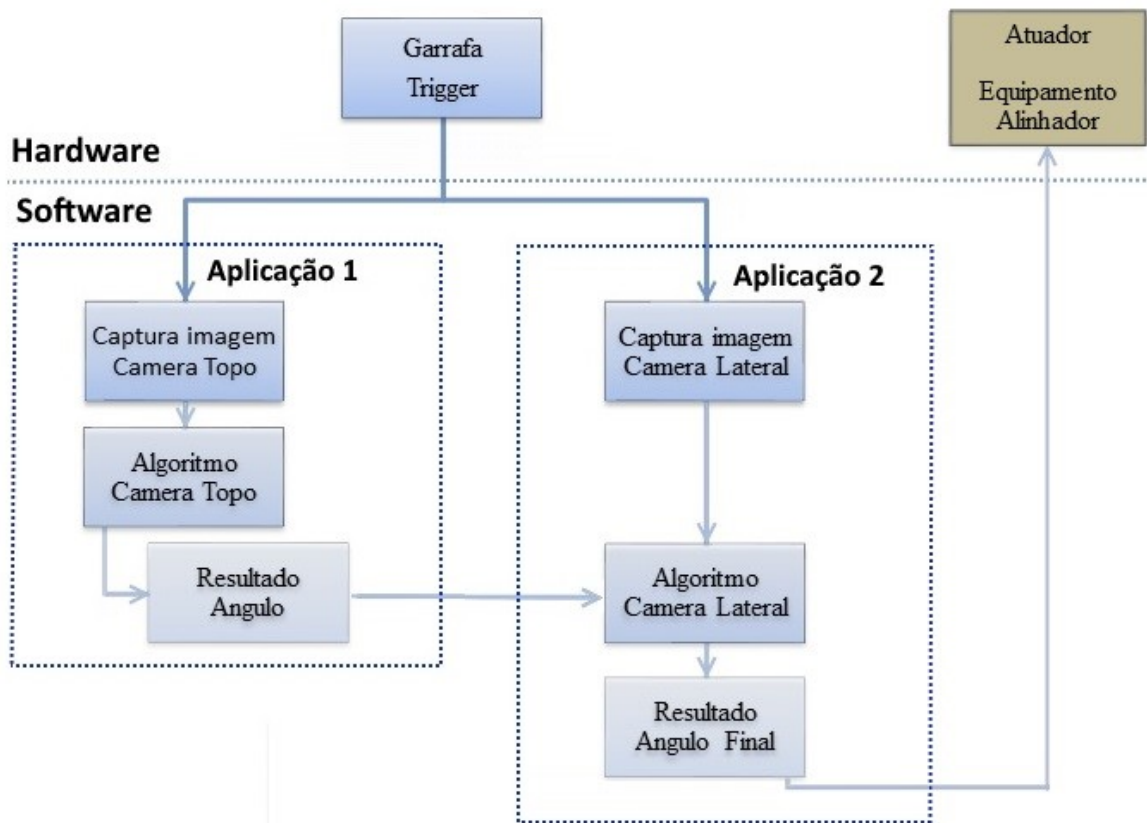


Figura 44 - Fluxo do processo.

A arquitetura de *software* proposta foi implementada utilizando a linguagem de programação C++ e recorrendo à biblioteca do OpenCV (*Open Source Computer Vision Library*).

### 4.2.1. Câmara de Topo

---

No algoritmo proposto o formato da garrafa é a característica chave que vai servir de modelo e de base de comparação com todas as restantes garrafas que irão estar em circulação. Cada novo modelo de garrafa produzido implica um novo modelo de comparação.

De modo a chegar ao formato da garrafa, após a captura da imagem inicial é necessário tratar a imagem da garrafa de forma a se conseguir extrair toda a informação necessária, que neste caso é o contorno da garrafa.

Após se conseguir encontrar os contornos que definem o formato da garrafa é determinado em torno da garrafa o retângulo que melhor se ajusta ao contorno detetado (retângulo de menor área possível), através deste retângulo é obtido um ângulo preliminar aproximado do valor real.

De forma a obter um resultado mais fiável é executado de seguida o algoritmo de *matching* ICP (*Iterative Closest Point*). Este algoritmo vai ser descrito em mais detalhe mais à frente neste subcapítulo.

O facto de ser fornecido ao algoritmo de *matching* o valor de rotação próximo do valor real faz com que seja necessário realizar menos iterações na procura do melhor *match*, tornando o algoritmo mais rápido.

A arquitetura final proposta para o funcionamento do algoritmo da câmara de topo é apresentada na Figura 45.



Figura 45 - Arquitetura algoritmo câmara de topo.

Descrevem-se de seguida cada um destes passos em mais detalhe.

## Captura de Imagem

Para ser possível utilizar a *webcam* PS3 Eye, devem ser instalados previamente os drivers e bibliotecas, para isso devem ser seguidos os passos descritos no **Anexo 3**, sendo necessário consultar o SDK da câmara de forma a ser possível trabalhar com ela.

Inicialmente é adquirido o dispositivo, verificando-se de seguida a aquisição do mesmo. Após a verificação é feita a inicialização da câmara já com as dimensões do ROI (região de interesse) e velocidade em fps (*frames* por segundo). É feita toda a configuração necessária e só após estas etapas se captura uma imagem como é exemplificado na Figura 46.



Figura 46 - Exemplo de uma imagem capturada pela webcam PS3 Eye.

## Pré-processamento – Binarização da imagem

O próximo passo é transformar a imagem captada numa imagem binária usando a operação de *threshold*.

Numa situação ideal o histograma de intensidade da imagem captada teria dois picos e um vale profundo entre eles, representando respetivamente o plano de fundo e o objeto. Numa situação como esta seria fácil identificar o limite do vale e conseqüentemente o valor de *threshold* necessário.

No entanto o facto de existirem zonas da garrafa que são mal iluminadas traduz-se numa pequena diferença de intensidade entre os pixels pertencentes ao tapete e à garrafa. A

correta diferenciação entre tapete e garrafa torna-se difícil nessas zonas da imagem e torna-se muito sensível a escolha do valor de *threshold*.

Inicialmente e de modo a contornar esta situação desfavorável, foram usadas as operações de *Dilate* e *Erode* de modo a preencher os espaços não reconhecidos da imagem (Figura 47). No entanto estas operações são bastante pesadas computacionalmente, pelo que poderiam comprometer a execução do algoritmo em tempo útil. Por esta razão tentou-se desenvolver o algoritmo excluindo a utilização destas funções.

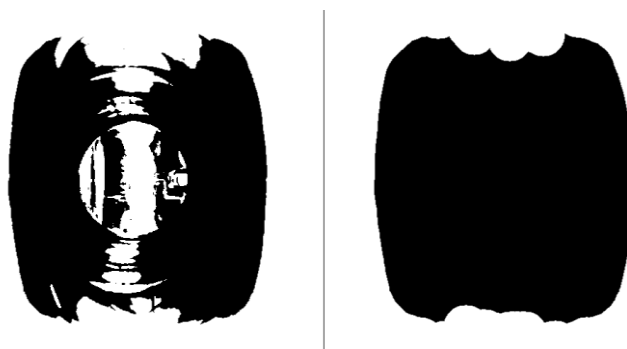


Figura 47 - Threshold sem Dilate e Erode VS Threshold com Dilate e Erode.

Após serem testadas diversas hipóteses optou-se pela utilização do *threshold* de OTSU, os resultados dos testes que levaram a esta escolha estão presentes no subcapítulo 5.1.2.

O método *threshold* de OTSU baseia-se numa ideia simples, encontrar o menor valor de variância entre o plano de fundo e o objeto, desta forma o valor de *threshold* usado é sempre adaptado a cada imagem captada. Através de um histograma em escalas de cinza este método iterativo assenta na separação dos píxeis em duas classes (plano de fundo e objeto), comparados os pesos de ambos os lados e removendo o mais pesado, esta operação é repetida até que os pesos de ambos os extremos se encontrem [39].

### Contornos e *Convex Hull*

Apesar de nessa fase a imagem atual ser uma imagem binária, esta contém toda a informação relevante sobre tamanho e forma da garrafa (vista de topo) necessária para o

reconhecimento da orientação da garrafa, à parte dum erro de 180° devido à simetria da mesma (ou outro valor para outros tipos de simetria).

A forma utilizada para determinar a forma da garrafa foi através da função de *convex hull*. Esta função determina a menor forma convexa que engloba a forma original. O seu funcionamento pode ser comparado a um elástico que envolve toda uma forma [2].

Foi utilizado o *convex hull* para identificar o contorno da garrafa, no entanto inicialmente eram identificadas várias formas na imagem, isto acontecia porque o *threshold* aplicado não criava uma única forma. Este facto resultava num funcionamento imperfeito do algoritmo desenvolvido, tendo havido a necessidade de modificar este funcionamento de modo a que todas as formas fossem envolvidas por um único *convex hull*. Na Figura 48, é exemplificado dois casos com as mesmas condições, no primeiro existe a deteção de múltiplas formas, no segundo caso apenas a deteção de uma forma, tal como pretendido [40]. A solução encontrada envolve tornar os vários contornos existentes num só contorno, deste modo a função de *convex hull* apenas irá identificar uma forma.

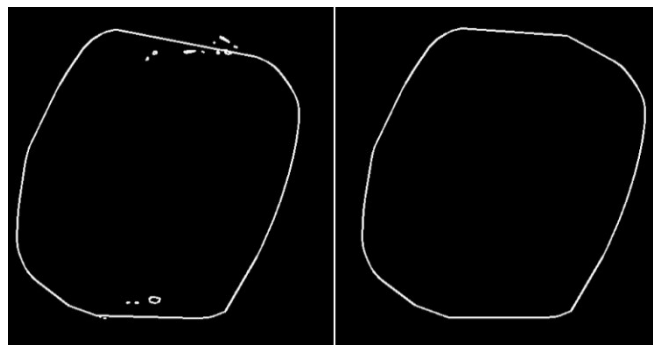


Figura 48 - Aplicação do Convex Hull, a) deteção de múltiplas formas e b) deteção de apenas uma forma.

## Método do Retângulo

O método do retângulo foi implementado através de uma função do OpenCV (*minAreaRect*). Esta função retorna o menor retângulo possível que pode encaixar numa área específica. O retângulo pode ter uma qualquer orientação desde que seja o menor retângulo possível [40].

Este método foi aplicado ao contorno que resulta da função do *Convex Hull*. Esta situação evidencia a necessidade de existir apenas um contorno resultante do *Convex Hull* tal como fora descrito anteriormente.

Através do retângulo traçado é possível retirar o ângulo da forma obtida através do ângulo de uma das maiores arestas do retângulo usando:

Note-se, no entanto, que o valor obtido poderá não ser o valor real da orientação da garrafa (à parte da questão da simetria), já que o menor retângulo pode encaixar de forma distinta. Este problema torna-se mais evidente em garrafas pequenas e ovalizadas tal como mostra a Figura 49, com as mesmas condições em duas garrafas na mesma posição, pequenas variações no ambiente resultam em mínimos retângulos com diferentes posições/orientações.

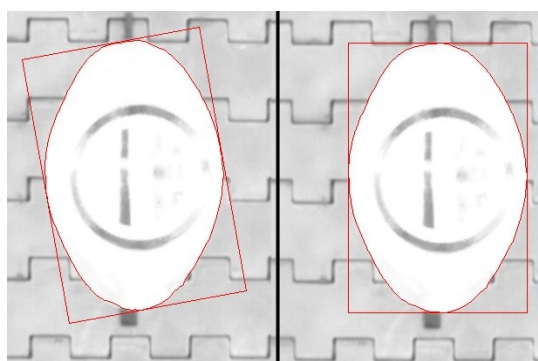


Figura 49 - Problema do método do retângulo.

Não obstante este problema, o resultado obtido serve de ponto de estimativa inicial aproximada para a orientação real da garrafa, valor que será aproveitado como estimativa inicial para a próxima etapa do algoritmo.

### **ICP – *Iterative Closest Point***

A variação no resultado do método anterior revela a necessidade de utilizar um algoritmo mais robusto tendo a solução passado por utilizar um algoritmo de *matching*.

Para tal é necessário utilizar um modelo base para que se possa realizar a correspondência entre o modelo de base e modelo de trabalho. Foi desenvolvido um

algoritmo de *teach-in* de modo a obter o modelo de base, este algoritmo será explicado posteriormente no subcapítulo 4.2.4.

Para a detecção da posição e orientação do contorno obtido face ao contorno do modelo de base (*matching*), foi selecionado o ICP (*Iterative closest Point*). No que respeita aos modelos, estes consistem em contornos da garrafa que resultam da função de *convex hull*, tanto para o modelo de base que é conseguido através do *teach-in* como para o modelo de trabalho que resulta da imagem captada pelo algoritmo da câmara de topo.

Através deste algoritmo o modelo de trabalho vai convergir iterativamente através da rotação e translação até encontrar o melhor encaixe com o modelo base.

O algoritmo ICP converge sempre monotonicamente para o mínimo local mais próximo da distância quadrática média entre os pontos dos dois objetos de forma a minimizar a distância entre modelo e contorno atual [41][42][43].

De modo a trabalhar com o algoritmo ICP deve-se primeiro transformar os dois modelos, modelo base e modelo atual em nuvens de pontos. O passo seguinte passa por detetar a correspondência ponto a ponto entre as duas nuvens através de funções de correspondência dos vizinhos mais próximos. O objetivo é obter a translação e rotação que reduzam o erro entre as duas nuvens de pontos.

A translação é calculada através da diferença entre o centro de massa das duas nuvens de pontos e a rotação é calculada através de uma aproximação SVD (Decomposição de Valores Singulares). Após o cálculo da translação e rotação são aplicadas as transformações calculadas.

Por fim é calculado o erro quadrático médio e se o valor do erro for inferior ao valor definido, o algoritmo termina. Se a convergência encontrada na iteração atual não tiver um valor de erro inferior ao definido, repete os passos a partir da correspondência entre pontos das duas nuvens. O algoritmo também finaliza após um número máximo de interações definindo pelo utilizador [43][44][45].

É possível ainda definir valores de rotação e translação iniciais para o modelo de trabalho. Esta ação faz com que o algoritmo realize menos iterações e conseqüentemente seja mais rápido, reduzindo ainda as hipóteses de o algoritmo encontrar outro mínimo local que não corresponda ao pretendido [41].

Na Figura 50 encontram-se dois exemplos em que foi executado o algoritmo com as mesmas garrafas, de modelo e de trabalho, na Figura 50 a) o algoritmo de ICP iniciou com

uma estimativa inicial próxima da real e na Figura 50 b) começou com uma estimativa inicial “0”. Comparando os dois casos é possível verificar que na Figura 50 a) com valor “0” na matriz rotação o algoritmo demorou bastante mais tempo tendo sido realizadas 41 iterações, enquanto na Figura 50 b) apenas foram feitas 8 iterações tendo sido conseqüentemente muito mais rápido a executar a convergência entre modelos. Na Figura 50 a imagem mais à esquerda apresenta a posição atual da garrafa que se pretende orientar. A imagem central exhibe o contorno da garrafa atual (a azul) encaixado sobre a imagem modelo, obtida pelo *teach-in*, rodado com o resultado do ICP. A imagem mais à esquerda apresenta os resultados obtidos (ângulo obtido, número de iterações e tempo do execução).

É ainda possível verificar que no caso Figura 50 b) o modelo de trabalho, a azul, encaixou melhor no modelo base da garrafa do que no caso da Figura 50 a). Isto acontece pois o ICP não garante a convergência para um mínimo global, mas sim para um mínimo local. Esta característica ajuda a justificar a necessidade de garantir que o ICP comece o cálculo iterativo o mais próximo possível do valor final.



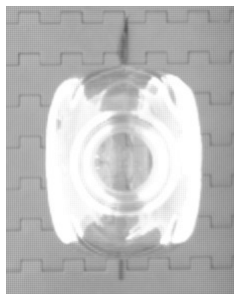
Figura 50 - Funcionamento do ICP com a) Valor "0" na matriz rotação b) Valor do ângulo obtido pelo método do retângulo na matriz rotação.

O facto de o algoritmo ICP fazer correspondência de pontos entre os dois modelos, levou a que se alterasse o algoritmo do ICP de forma a retirar os pontos centrais dos modelos correspondentes à zona mal iluminada. Esta alteração visa reduzir o erro criado pela falta de iluminação na zona central da imagem e possível deteção de um mau contorno nessas zonas, desta forma o encaixe será feito apenas entre os pontos das zonas bem iluminadas. De modo a validar esta alteração foram realizados vários testes com e sem os pontos centrais tendo sido comparados posteriormente os resultados obtidos. Estes testes e resultados podem ser consultados no subcapítulo 5.1.3.

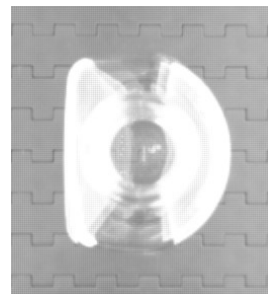
### **Especificidades do Tipo de Garrafa**

A partir de agora irá ser feita distinção entre garrafas simétricas em dois eixos designando-as de agora em diante por garrafa do tipo A (Figura 51), e a garrafas simétricas em apenas um eixo designando-as por garrafa do tipo B (Figura 52).

Garrafas do tipo A e B são os casos mais frequentes na indústria. Garrafas com mais eixos de simetria não foram consideradas neste projeto.



*Figura 51 - Garrafa simétrica em 2 eixos  
(Garrafa do tipo A)*



*Figura 52 - Garrafa simétrica em apenas  
1 eixo (Garrafa do tipo B)*

No caso de garrafas do tipo A (Figura 51), (com dois eixos de simetria) o ICP pode encaixar em duas soluções corretas rodadas 180°. Nestas situações a câmara lateral verifica o valor de orientação obtido.

No caso de garrafas do tipo B (Figura 52) apenas existe uma solução de encaixe possível, no entanto, o algoritmo de ICP pode encontrar um mínimo local que não corresponda à orientação correta (ver subcapítulo 5.2.1, Figura 89). Nestas situações apesar de o algoritmo da câmara lateral identificar corretamente o lado da garrafa, e retificar o valor

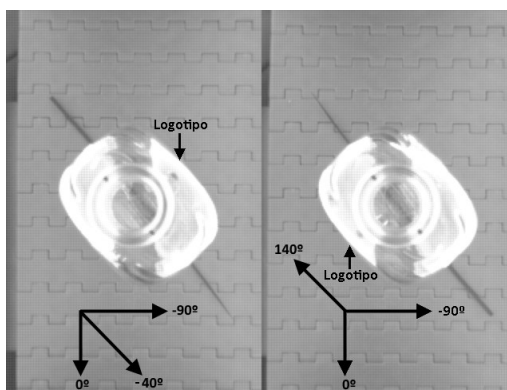
de rotação, o valor calculado inicialmente pelo ICP pode conter um erro maior do que o admissível. Nestes casos a solução passa exclusivamente pela utilização da câmara de topo, e executar o algoritmo ICP duas vezes, com valores iniciais de rotação desfasados em  $180^\circ$ .

No subcapítulo 5.2.4 são apresentados os resultados dos testes efetuados para garrafas do tipo B, considerando a solução apresentada em cima.

## 4.2.2. Câmara Lateral

---

O resultado obtido pelo algoritmo da câmara de topo poderá estar correto ou ter um erro de  $180^\circ$ , face ao valor real da orientação da garrafa. Isto acontece nas situações em que temos garrafas com um formato simétrico onde existem duas possíveis orientações para cada formato, sendo impossível distinguir, nestas situações, entre os dois ângulos possíveis apenas pelo formato da garrafa obtido pela câmara de topo. Na Figura 53 é apresentada uma garrafa em posições desfasas  $180^\circ$ , no entanto o ângulo obtido pelo algoritmo da câmara de topo, em ambas as situações é o mesmo.



*Figura 53 - Garrafa em duas posições simétricas,  $-40^\circ$  e  $140^\circ$ .*

Este facto elucida a necessidade de utilizar uma câmara lateral que ajude a esclarecer entre as duas possíveis soluções (caso o corpo da garrafa tiver alguma gravura que distinga entre as duas faces).

Na Figura 54 é apresentada a arquitetura proposta para o algoritmo da câmara lateral.

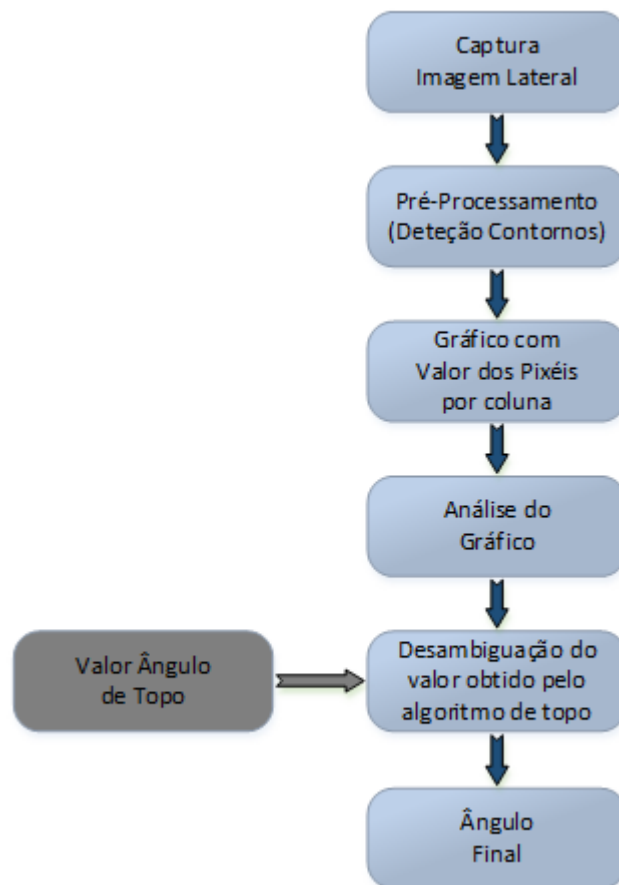


Figura 54 - Arquitetura algoritmo câmara lateral.

Descrevem-se de seguida cada um destes passos em mais detalhe.

## Captura de Imagem

Após a instalação de todos os drivers e bibliotecas é possível trabalhar com a câmara uEye da IDS. No subcapítulo 3.2.1, é possível verificar as etapas necessárias para a utilização da câmara, sendo necessário consultar o SDK da câmara de forma a ser possível trabalhar com ela [46].

O início da captura de imagem é dado pelo sinal fotocélula que está à entrada de *trigger* da câmara. Como a fotocélula teve de ser instalada na entrada da estrutura e como não era possível saber a velocidade instantânea do transportador foi feito um atraso à captura através da câmara através de um *trigger* por *software*.

Na Figura 55 é apresentado um exemplo de uma imagem capturada pela câmara lateral.



Figura 55 - Exemplo de imagem captada através da câmara uEye da IDS.

### Pré-processamento - Filtros

No caso da imagem lateral foi aplicado um pré-processamento à base de filtros. A primeira operação aplicada à imagem foi a remoção de algum ruído inicial através de um filtro gaussiano.

Com o objetivo de detetar gravuras com relevo no corpo da garrafa foram testados vários filtros de deteção de arestas de modo a perceber qual seria o mais eficaz. Os resultados dos testes efetuados encontram-se no subcapítulo 5.1.5 [2].

De seguida aplica-se o filtro *sobel* (gradiente de *sobel*), mas retirando a componente em X do gradiente, de modo a minimizar o efeito das arestas das laterais da garrafa e a realçar apenas os contornos das gravações da garrafa. Na Figura 56 é apresentada a aplicação do filtro *sobel* à mesma garrafa em duas posições distintas. No primeiro caso em que a garrafa está com uma orientação de  $-20^\circ$  a gravura está virada de frente para a câmara. No segundo caso com uma orientação de  $-120^\circ$  a gravura encontra-se virada para o lado oposto da câmara, sendo ainda visível pelo facto de a garrafa ser transparente. Através deste exemplo (Figura 56) verifica-se que é possível distinguir se a garrafa está com a gravura para a câmara ou para o lado oposto, sendo possível distinguir entre as duas posições possíveis da garrafa que resultam do algoritmo de topo. Esta distinção é feita a partir da identificação dos pixéis brancos criados pela gravura, através do número de pixéis brancos do gráfico e do posicionamento dos valores no gráfico.

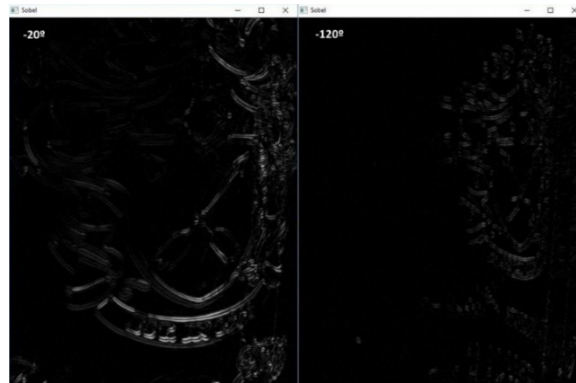


Figura 56 - Filtro de Sobel aplicado a duas imagens capturadas pela câmara lateral.

### Construção do gráfico e análise dos dados

A análise dos dados da imagem após a aplicação do filtro é feita através de um gráfico de colunas, em que cada coluna branca do gráfico tem o valor corresponde à soma total do valor de todos os pixels da respetiva coluna da imagem criada pelo filtro *sobel*. O eixo do x representa a posição horizontal na imagem e o eixo do y, de cima para baixo, representam o valor da soma dos pixels. Na Figura 57 são apresentados os gráficos relativos às imagens da Figura 56. É possível verificar que é na parte direita de cada gráfico onde se concentram os valores de pico, correspondendo à localização da gravura da garrafa. É também possível verificar a diferença entre os valores de pico das duas situações, valor de pico alto quando a gravura está virada para a câmara e valor de pico baixo quando está no lado oposto. Apesar de na Figura 57 para o caso dos  $-120^\circ$  a gravura estar virada para o lado oposto da câmara, o facto de a garrafa se transparente torna possível a distinção de parte da gravura da garrafa apesar de ficar mais atenuada.

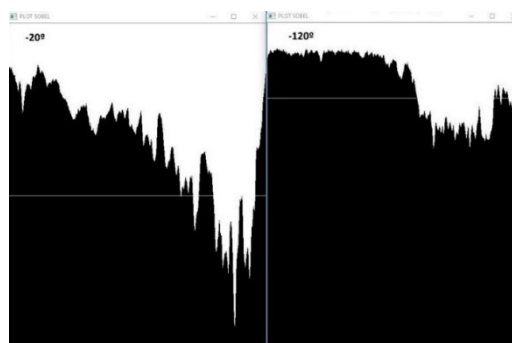


Figura 57 - Gráfico com soma do valor do peso de todos os pixels por coluna.

Antes de analisar os valores obtidos pelo gráfico, estes devem ser normalizados (entre 0 e 1) para que os cálculos sejam feitos usando valores com a mesma base.

Na análise dos dados foram avaliadas várias métricas, nomeadamente a variância e a média ponderada, tendo-se concluído que o valor da posição de pico, isto é, a posição da coluna com valor máximo, e a quantidade de pixéis brancos no gráfico seriam suficientes para tomar uma decisão correta.

Através da posição do pico é possível identificar a posição da gravura relativamente à câmara, nomeadamente se está no lado direito da imagem (entre  $0^\circ$  e  $90^\circ$ ) ou do lado esquerdo (entre  $-90^\circ$  e  $0^\circ$ ), no entanto, não é possível identificar se a gravura está virada para câmara ou se, pelo contrário, está virada para o lado oposto, apenas através do pico do gráfico, sendo necessário recorrer à quantidade de pixéis brancos, porque do lado de trás os contornos ficam menos nítidos. Se a quantidade de pixéis brancos for inferior a determinado valor então significa que a gravura estará virada para o lado oposto da câmara, se a quantidade de pixéis brancos for superior a esse mesmo valor significa que a gravura se encontra virada para a câmara. Os valores de pixéis máximo e mínimo são valores obtidos através do processo de *teach-in*, ver subcapítulo 4.2.4.

### 4.2.3. Resultado final

---

O resultado da orientação final da garrafa é conseguido através da análise conjunta do valor de rotação obtido pelo algoritmo de topo e os dados calculados através do gráfico de pixéis brancos obtido pelo algoritmo da câmara lateral.

Ao longo dos testes realizados verificou-se que a métrica, número de pixéis brancos, permitia uma decisão correta relativamente às hipóteses mais próximas da orientação para valores de rotação próximos de  $0^\circ$  (com a gravura virada para a câmara lateral) ou de  $180^\circ$  (com a gravura virada para o lado oposto à câmara lateral) (Figura 58, gráficos para  $0^\circ$  e  $20^\circ$ ), e nas situações em que o pico máximo do gráfico fosse encostado a uma das laterais do gráfico seria uma boa hipótese para valores de rotação mais longe de  $0^\circ$  e de  $180^\circ$  (Figura 58, gráficos para  $60^\circ$  e  $-30^\circ$ ).

Assim a decisão entre qual métrica usar para os cálculos depende do valor retornado pelo algoritmo da câmara de topo. Com base nas experiências efetuadas, foi estabelecido

que o valor retornado for entre  $-20^\circ$  e  $20^\circ$  a métrica usada é o número de pixels brancos, se o valor retornado for fora da gama entre  $-20^\circ$  e  $20^\circ$  a métrica usada será a posição do pico em X.

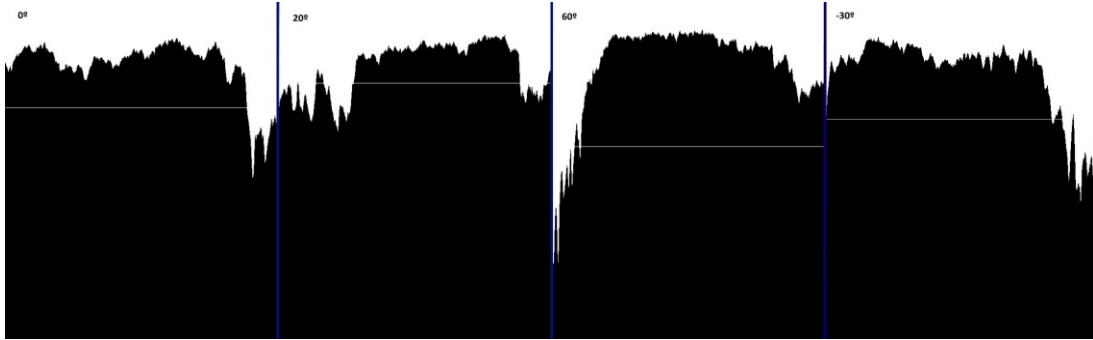


Figura 58 - Filtro Sobel para várias rotações.

#### 4.2.4. *Teach-In* – Obtenção do Modelo

---

O método de *teach-In* é baseado na ideia da técnica de programação por exemplo (PbE – *programming by example*), em que o utilizador ensina um novo método ao computador. No caso do algoritmo proposto o objetivo passa por o utilizador guardar o modelo que vai ser utilizado como referência na comparação iterativa do algoritmo de match utilizado, neste caso pelo ICP.

O objetivo será o operador correr o algoritmo de *teach-in*, apenas uma vez sempre que se inicia a produção de uma nova garrafa. Visto que nas linhas de transporte de garrafas onde é suposto aplicar um equipamento deste género só se trabalha com um modelo de garrafas de cada vez.

Com o transportador que atravessa o equipamento parado, deve-se colocar a garrafa modelo na posição em que se deseja que todas as garrafas produzidas sejam alinhadas.

O facto de a região central da garrafa ser mal iluminada faz com que o modelo apresente falhas nessas zonas. De modo a corrigir esta falha criou-se a possibilidade de voltar a correr o *teach-in*, sendo o operador obrigado a rodar manualmente a garrafa  $90^\circ$ , e posteriormente feita a junção das duas imagens formando assim um único modelo, é possível

verificar a sequência de imagens através da Figura 59. Os valores máximos e mínimo de pixels brancos também são obtidos através deste método.

O programa desenvolvido pode ser executado em modo *teach-in* para registo do modelo ou em modo de produção para alinhamento das garrafas.

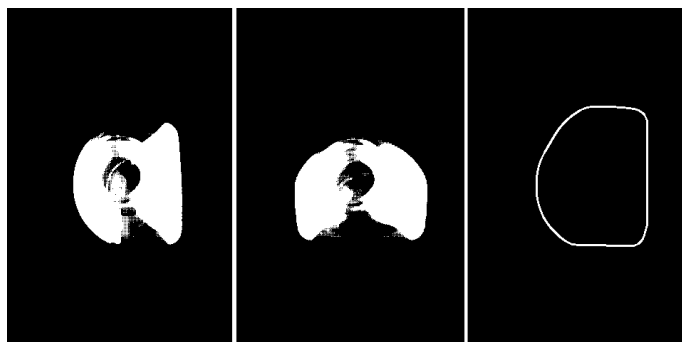


Figura 59 - Obtenção de contorno pelo Teach-in

#### 4.2.5. *Threads e Mutexs*

---

Em diversas aplicações existe a necessidade de várias *threads* a correrem em simultâneo e partilharem informação entre si. Nestas situações a utilização de *threads* simplifica e torna mais rápida toda a aplicação. Foi precisamente atendendo a estes aspetos que surgiu a necessidade de utilizar *threads* neste projeto [47].

Estruturalmente o projeto está dividido em dois algoritmos (câmara de topo e câmara lateral), havendo em determinadas alturas necessidade de partilha de informação entre ambos.

A partilha de informação começa na necessidade de saber quando se deve iniciar a captura das imagens, uma vez que apenas a câmara lateral, tem a possibilidade de ligar um sinal de *trigger* externo, ao qual foi ligado o sinal da fotocélula que deteta a passada de garrafas.

Estando a aplicação a correr, só após receber o sinal da célula inicia o processo de aquisição de imagem, sendo o algoritmo da câmara lateral que envia a ordem para a captura de imagem por parte do algoritmo da câmara de topo. Esta situação em que um processo fica à espera da informação do outro foi implementada através do uso de *mutex*. Através do uso

de um semáforo (*mutex*) é possível bloquear em determinada etapa o processamento da aplicação, ficando assim até que seja novamente desbloqueada.

O uso de semáforo também é usado uma vez que o cálculo final da orientação da garrafa é feito através do algoritmo da câmara lateral, no entanto para executar os cálculos corretamente é necessário usar o valor de rotação calculado pelo algoritmo da câmara de topo. Uma vez que o algoritmo da câmara lateral é tendencialmente mais rápido do que o algoritmo da câmara de topo, faz com que tenha de ficar bloqueado à espera do valor calculado pelo algoritmo da câmara de topo.

A troca de informação sobre o bloqueio das *mutex* e dos valores de rotação transferidos entre algoritmos é feito através de variáveis atômicas de forma a garantir a atualização em ambas as *threads* de forma segura.

Na Figura 60 é apresentado o diagrama de funcionamento proposto com utilização de *threads*, no subcapítulo 5.2.3 são apresentados testes efetuados com o objetivo de medir os tempos de execução de diversos processos.

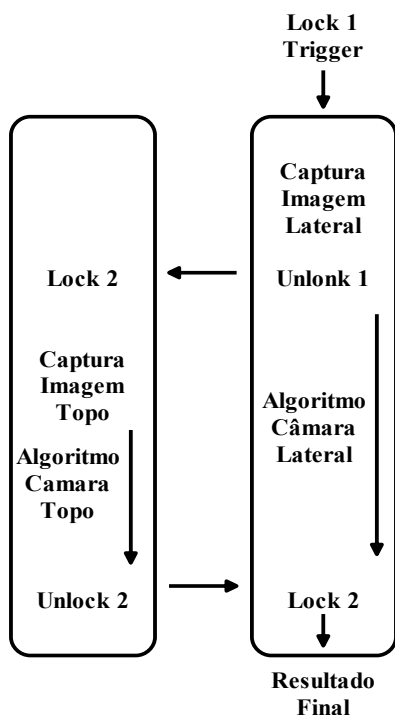


Figura 60 - Diagrama do funcionamento proposto com threads e mutex para garrafas tipo A

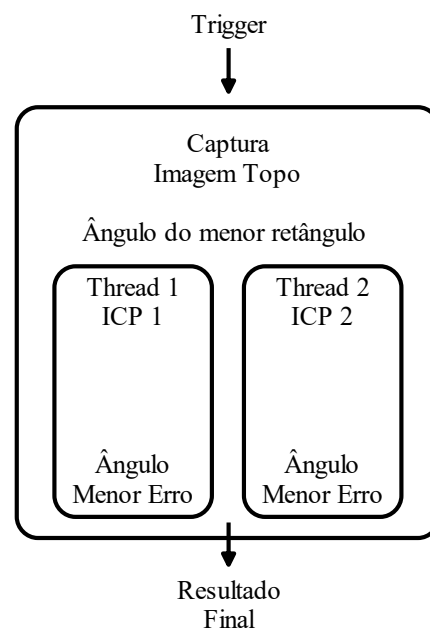


Figura 61 - Diagrama do funcionamento proposto com threads e mutex para garrafas tipo B.

No caso de garrafas do tipo B, em que apenas é usada a câmara de topo, as *threads* são usadas para que os dois algoritmos ICP possam ser executado em paralelo, tal como demonstra a Figura 61.

### 4.3. Considerações Finais

---

Em termos de implementação o projeto é constituído por um programa principal responsável por iniciar cada *thread*. Através do programa principal é também possível chamar o programa de *teach-in*.

Ao longo da implementação do código procurou-se não só que os resultados práticos fossem fiáveis, mas também que o algoritmo proposto fosse rápido o suficiente para poder ser usado numa linha de transporte de garrafas.

É calculado previamente um ângulo que será usado na matriz rotação do algoritmo, de forma a garantir que o ICP é inicializado próximo da solução correta, e assim reduza as hipóteses de encontrar um mínimo local que não seja o correto. Ao fazer-se isto reduz-se também o número de iteração realizadas e conseqüentemente o tempo do algoritmo.

O facto de o algoritmo de ICP realizar por vezes um número de iterações considerável faz com que seja tendencialmente mais lento computacionalmente.

No caso de garrafas do tipo A o valor calculado pela câmara de topo tem uma incerteza de 180°, que só é resolvido através da câmara lateral. No caso de garrafas do tipo B essa incerteza não existe sendo apenas necessária a câmara de topo.

O facto ter os algoritmos a correrem em paralelo, cada um na sua *thread*, faz com que o tempo geral de processamento seja inferior em sistemas dual-core ou superiores.



## 5. Testes e Resultados Finais

---

Neste capítulo irão ser apresentados alguns dos testes efetuados ao longo do desenvolvimento do projeto e que de alguma forma ajudaram a tomar decisões na elaboração do algoritmo. Serão também apresentados os testes e resultados finais de forma a validar o conceito apresentado neste projeto.

Todos os testes foram realizados num computador com as seguintes características base:

- Processador: Dual Core T2410-2,00 GHz
- Ram: 6 Gb
- Arquitetura: Windows 10 X64

### 5.1. Testes Efetuados

---

Neste capítulo serão apresentados vários testes que foram efetuados ao longo do desenvolvimento sistema proposto. Os testes e resultados permitem comprovar e apoiar as decisões tomadas.

Ao longo dos testes efetuados foram criados alguns métodos de *debug* que são apresentados na Figura 62. Os valores teóricos do ângulo são obtidos através do apontador preto por baixo da garrafa, direcionando-o para o ângulo pretendido que é apresentado no referencial da Figura 43.

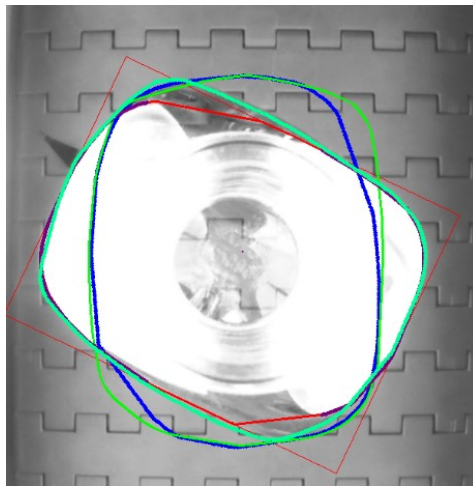
O retângulo a vermelho representa o mínimo retângulo criado pelo método retângulo, sobre o contorno da garrafa, apresentado também a vermelho.

O contorno verde corresponde ao modelo de base do ICP criado pelo *teach-in*.

O contorno representado a azul-escuro corresponde ao modelo de trabalho atual criado pelo ICP, e a sua posição corresponde à última iteração realizada pelo algoritmo.

O contorno original do modelo de trabalho atual sem rotação está sinalizado a roxo, no exemplo apresentado é possível verificar que na zona central não existe contorno devido a ter-se desconsiderado os pontos centrais do modelo.

Por fim o contorno azul-claro corresponde ao modelo base criado pelo *teach-in*, mas neste caso foi aplicado ao modelo a translação e rotação encontrados iterativamente pelo ICP. Com este resultado espera-se perceber se o modelo base encaixa na imagem de trabalho captada.



*Figura 62 - Exemplo de resultado usado como debug.*

### **5.1.1. Garrafas utilizadas**

---

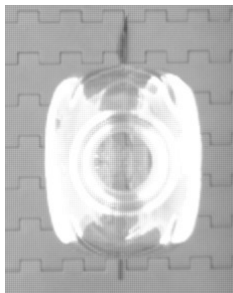
Neste subcapítulo são apresentadas da Figura 63 à Figura 71 as garrafas usadas nos testes efetuados. As garrafas são expostas em três posições e da seguinte maneira, foto em perspectiva, foto de topo e foto lateral. Foram usadas três garrafas diferentes de modo a testar o algoritmo para diferentes condições e avaliar desta forma o seu funcionamento. Apenas desta forma é possível validar corretamente o conceito apresentado.

## **Garrafa 1 – Retangular (Tipo A)**

Esta é uma garrafa grande (260mm) e de formato retangular tal como se pode ver da Figura 63 à Figura 65.



*Figura 63 - Garrafa 1 vista em perspetiva*



*Figura 64 - Garrafa 1 vista de cima*



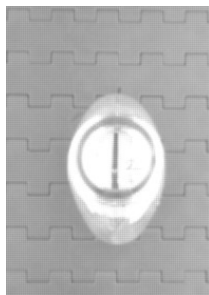
*Figura 65 - Garrafa 1 vista lateral*

## **Garrafa 2 – Oval Pequena (Tipo A)**

Esta é uma garrafa pequena (205mm) e de formato oval tal como se pode ver da Figura 66 à Figura 68.



*Figura 66 - Garrafa 2 vista em perspetiva*



*Figura 67 - Garrafa 2 vista de cima*



*Figura 68 - Garrafa 2 vista lateral*

### Garrafa 3 – D Shape (Tipo B)

Esta é uma garrafa grande (285mm) e de formato em “D” (*D shape*) tal como se pode ver da Figura 69 à Figura 71.



Figura 69 - Garrafa 3 vista em perspectiva

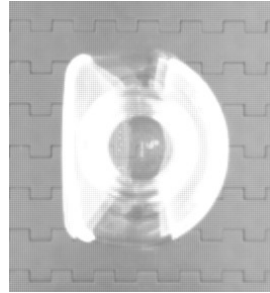


Figura 70 - Garrafa 3 vista de cima



Figura 71 - Garrafa 3 vista lateral

#### 5.1.2. *Treshhold* Imagem de Topo

---

Na seleção do método mais eficiente para binarização da imagem captada foram testadas varias hipóteses, tendo sido analisados após os testes os vários resultados e tempos de cada operação. Estes testes tiveram o objetivo de excluir a utilização das funções de *Erode* e *Dilate* e ao mesmo tempo obtermos uma imagem com a forma da garrafa com qualidade.

Foram executados alguns testes recorrendo a vários tipos de filtros e binarizações adaptativas (*Adaptive Thresholds*), sendo apresentados na Figura 72 apenas os três que apresentaram melhores resultados.

*Threshold* de OTSU com *bilateral filter* - 121.102 ms

*Threshold* normal (INV) - 0.6796 ms

*Threshold* de OTSU - 0.8367 ms

Apesar de o teste com o *bilateral filter* apresentar um melhor resultado final a escolha do método a usar no projeto recaiu sobre o *threshold* de OTSU, uma vez que apresenta um tempo de processamento bastante menor (140x menor).

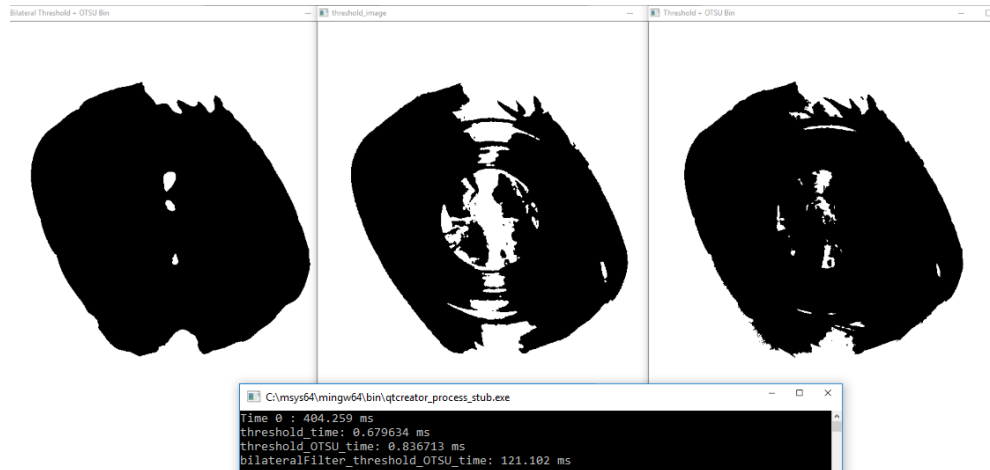


Figura 72 - *Bilateral filter + Threshold OTSU / Threshold / Threshold OTSU – Resultados e tempos.*

### 5.1.3. ICP – *Iterative Closest Point*

---

Sendo o algoritmo de ICP uma das peças mais importantes do *software* desenvolvido foi também sobre ele que foram realizados a maior quantidade de testes.

No primeiro teste efetuado, verificou-se a vantagem de utilizar o valor de rotação obtido pelo método do retângulo como valor inicial de rotação, sendo este um valor de rotação próximo do valor real.

É possível verificar através da Tabela 6 que nos testes em que o ICP não utilizou para os cálculos um valor de ângulo inicial previamente calculado, este apresenta um valor muito diferente do valor previsto. Esta situação acontece porque o ICP é executado iterativamente até encontrar um mínimo local, podendo convergir para um ângulo diferente do pretendido.

Nas situações em que apesar de se iniciar o ICP com valores de rotação distantes dos valores pretendidos os resultados obtidos são próximos do esperado, é possível verificar que o tempo de processamento do ICP é consideravelmente mais elevado. Tal acontece porque o ICP necessita de realizar mais iterações até convergir.

*Tabela 6 - Valores do ICP com e sem valor inicial de rotação.*

		Valor ângulo previsto	Valor ângulo obtido	Tempo processamento (ms)
Teste 1	Sem ângulo inicial	30°	-1,02°	230,386
Garrafa 1	Com ângulo inicial	30°	25,02°	437,716
Teste 2	Sem ângulo inicial	50°	2,74°	801,878
Garrafa 1	Com ângulo inicial	50°	42,75°	886,775
Teste 3	Sem ângulo inicial	30°	28,57°	1478,82
Garrafa 3	Com ângulo inicial	30°	28,36°	882,42
Teste 4	Sem ângulo inicial	50°	36,94°	796,695
Garrafa 3	Com ângulo inicial	50°	42,19°	249,179

Após este teste verificou-se que seria bastante vantajoso calcular previamente um ângulo próximo do valor final do ICP, de modo a que o cálculo iterativo comece mais perto do valor de convergência.

Após análise dos valores obtidos na Tabela 6 verifica-se que os valores de rotação obtidos têm uma grande diferença para o valor esperado e que os tempos de processamento são maiores do que o esperado.

Desta forma, foram realizados testes adicionais com o objetivo de obter resultados com menor erro e com tempos de execução inferiores. Relativamente ao valor de erro, e uma vez que a zona central dos modelos é sempre a que apresenta maior diferença com a realidade, testou-se se a retirada dos pontos centrais dos modelos, traria uma convergência entre modelos com menor erro e menos tempo. No que respeita ao tempo de execução do algoritmo de ICP testou-se ainda se ao retirar dos cálculos o valor da translação o tempo de execução seria mais baixo.

Na Tabela 7 são apresentados os resultados dos testes efetuados. No primeiro quadro são apresentados os resultados do ICP sem alterações (ICP normal), no segundo os resultados quando são retirados os pontos centrais dos modelos no terceiro e quarto são apresentados os valores sem translação sendo que no quarto também foram desconsiderados os pontos centrais dos modelos.

Tabela 7 - Análise dos dados aos testes do ICP câmara IDS.

		1-ICP normal				
Teórico (°)	Pelo Retângulo (°)	Tempo ICP (ms)	Pratico (°)	Nº iterações	Rect – ICP (°)	Erro (°)
-90	-88,54	678,51	-89,63	16	1,09	0,37
-60	-64,52	517,35	-65,20	13	0,68	-5,20
-30	-28,3	1036,33	-30,30	29	2,00	-0,30
0	-6,34	777,04	-2,74	20	-3,60	-2,74
20	19,89	838,09	20,90	22	-1,01	0,90
<b>Valor máx. de erro (°)</b>						<b>-5,20</b>
<b>Média de erro (°)</b>						<b>1,90</b>
<b>Média de Tempo (ms)</b>						<b>769,46</b>

		2-ICP normal retirando pontos centro				
Teórico (°)	Pelo Retângulo (°)	Tempo ICP (ms)	Pratico (°)	Nº iterações	Rect – ICP (°)	Erro (°)
-90	-88,54	375,34	-89,19	12	0,65	0,81
-60	-64,52	917,22	-59,77	37	-4,75	0,23
-30	-28,3	311,45	-28,66	11	0,36	1,34
0	-6,34	582,11	-2,27	22	-4,07	-2,27
20	19,89	253,03	20,29	9	-0,40	0,29
<b>Valor máx. de erro (°)</b>						<b>-2,27</b>
<b>Média de erro (°)</b>						<b>0,99</b>
<b>Média de Tempo (ms)</b>						<b>487,83</b>

		3-ICP sem translação				
Teórico (°)	Pelo Retângulo (°)	Tempo ICP (ms)	Pratico (°)	Nº iterações	Rect – ICP (°)	Erro (°)
-90	-88,54	3093,71	-91,25	72	2,71	-1,25
-60	-64,52	2444,37	-67,08	63	2,56	-7,08
-30	-28,3	661,28	-28,87	16	0,57	1,13
0	-6,34	338,66	-4,81	6	-1,53	-4,81
20	19,89	1054,49	20,44	26	-0,55	0,44
<b>Valor máx. de erro (°)</b>						<b>-7,08</b>
<b>Média de erro (°)</b>						<b>2,94</b>
<b>Média de Tempo (ms)</b>						<b>1518,50</b>

		4-ICP sem translação retirando pontos centro				
Teórico (°)	Pelo Retângulo (°)	Tempo ICP (ms)	Pratico (°)	Nº iterações	Rect – ICP (°)	Erro (°)
-90	-88,54	1495,54	-91,59	47	3,05	-1,59
-60	-64,52	1283,04	-59,39	45	-5,13	0,61
-30	-28,3	281,3	-28,38	9	0,08	1,62
0	-6,34	547,64	-2,34	21	-4,00	-2,34
20	19,89	1465,57	19,36	53	0,53	-0,64
<b>Valor máx. de erro (°)</b>						<b>-2,34</b>
<b>Média de erro (°)</b>						<b>1,36</b>
<b>Média de Tempo (ms)</b>						<b>1014,62</b>

Analisando os dados apresentados na Tabela 7 é possível verificar que é o segundo teste que apresenta tanto o valor médio de erro como o valor máximo de erro mais baixos. Relativamente ao tempo de execução do algoritmo esta é também a solução que apresenta os melhores valores. Os testes em que se retira o valor da translação do cálculo do ICP revelaram ser as piores soluções testadas. O facto de a garrafa não estar sempre centrada origina sempre uma diferença de translação entre modelos, obrigando nestas situações o algoritmo a realizar mais iteração na busca de convergência.

Da Figura 73 à Figura 76 são apresentadas imagens dos resultados práticos obtidos para cada um dos testes efetuados considerando um ângulo de 20°. Comparando cada uma das imagens é possível verificar através do resultado mais à direita de cada imagem, que o teste da Figura 74 foi o que apresentou uma melhor correspondência.

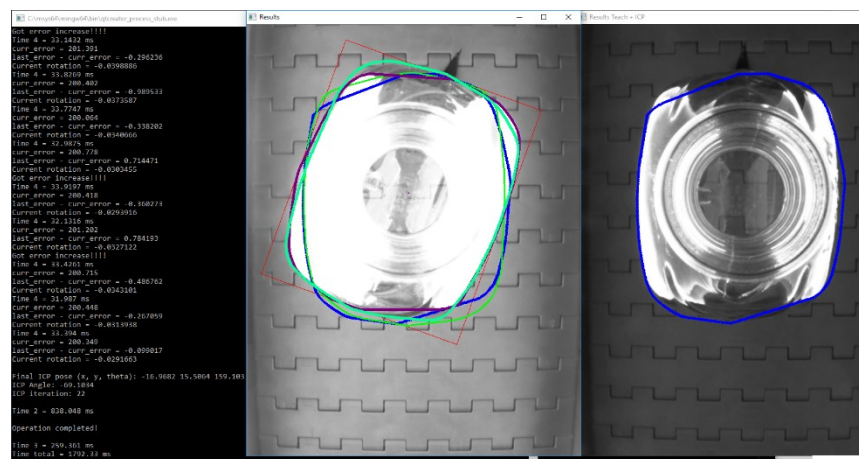


Figura 73 - Teste 1 - ICP normal para o ângulo de 20°.

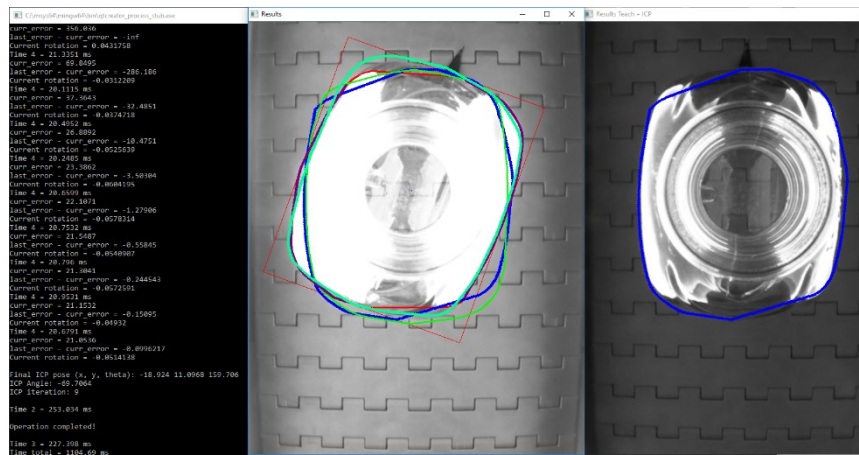


Figura 74 - Teste 2 - ICP sem pontos centrais no modelo para o ângulo de 20°.

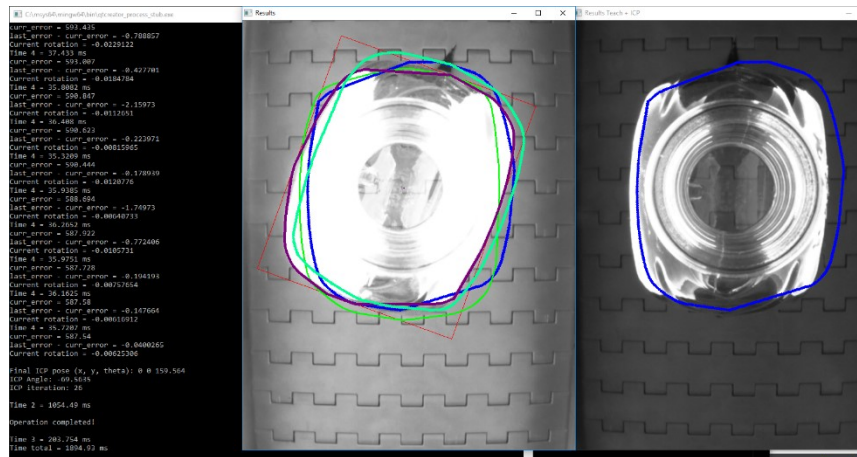


Figura 75 - Teste 3 - ICP sem cálculo da translação para o ângulo de 20°.

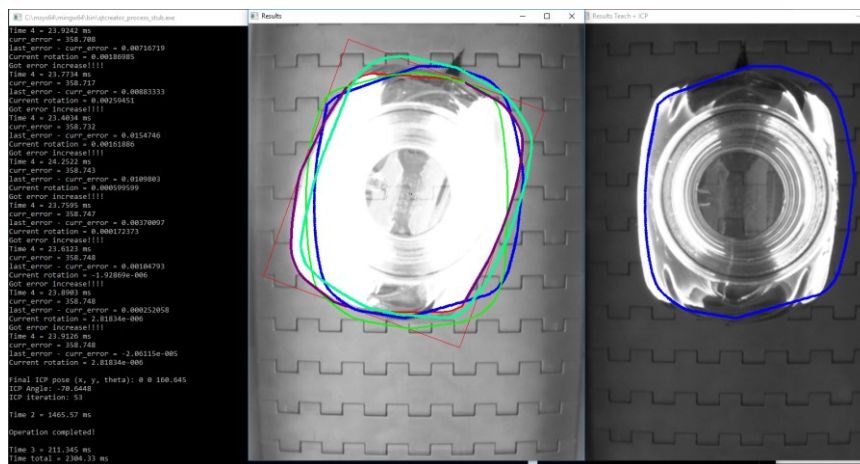


Figura 76 - Teste 4 - ICP sem pontos centrais no modelo e sem cálculo da translação para o ângulo de 20°.

Os testes efetuados inicialmente foram realizados utilizando a câmara da uEye da IDS, uma vez que a necessidade de trocar a mesma para a lateral apenas surgiu quando se iniciou o desenvolvimento do algoritmo para a câmara lateral. Após a troca de câmaras foram efetuados novamente os testes ao algoritmo do ICP, mas apenas para os dois melhores casos, ou seja, excluindo os testes sem o cálculo da translação.

Na Tabela 8 e na Figura 77 e Figura 78 são apresentados os resultados dos testes com o ICP desta vez com a câmara PS3 Eye. Estes testes foram efetuados para três garrafas diferentes, no entanto, tal como para o primeiro conjunto de testes, apenas são apresentados os resultados para o caso da garrafa 1. Os resultados finais para as outras duas garrafas são coincidentes com o resultado aqui apresentado.

Tabela 8 - Análise dos dados aos testes do ICP câmara PS3 Eye.

		1-ICP normal				
Teórico (°)	Pelo Retângulo (°)	Tempo ICP (ms)	Pratico (°)	Nº iterações	Rect – ICP (°)	Erro (°)
-90	-92,73	91,72	-92,35	4	-0,38	-2,35
-60	-67,75	131,23	-68,96	7	1,21	-8,96
-30	-30,96	474,63	-34,44	28	3,48	-4,44
0	0,00	115,73	-0,15	6	0,15	-0,15
20	14,93	1220,97	20,94	77	-6,01	0,94
<b>Valor máx. de erro (°)</b>						<b>-8,96</b>
<b>Média de erro (°)</b>						<b>3,37</b>
<b>Média de Tempo (ms)</b>						<b>406,86</b>

		2-ICP normal retirando pontos centro				
Teórico (°)	Pelo Retângulo (°)	Tempo ICP (ms)	Pratico (°)	Nº iterações	Rect – ICP (°)	Erro (°)
-90	-92,73	116,53	-92,25	7	-0,48	-2,25
-60	-67,75	64,51	-67,66	4	-0,09	-7,66
-30	-30,96	120,95	-30,31	11	-0,65	-0,31
0	0,00	67,29	0,18	6	-0,18	0,18
20	14,93	197,56	19,13	19	-4,20	-0,87
<b>Valor máx. de erro (°)</b>						<b>-7,66</b>
<b>Média de erro (°)</b>						<b>2,25</b>
<b>Média de Tempo (ms)</b>						<b>113,37</b>

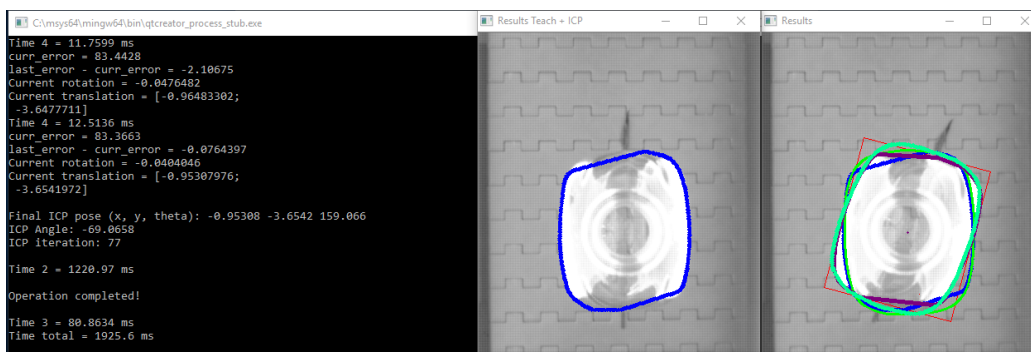
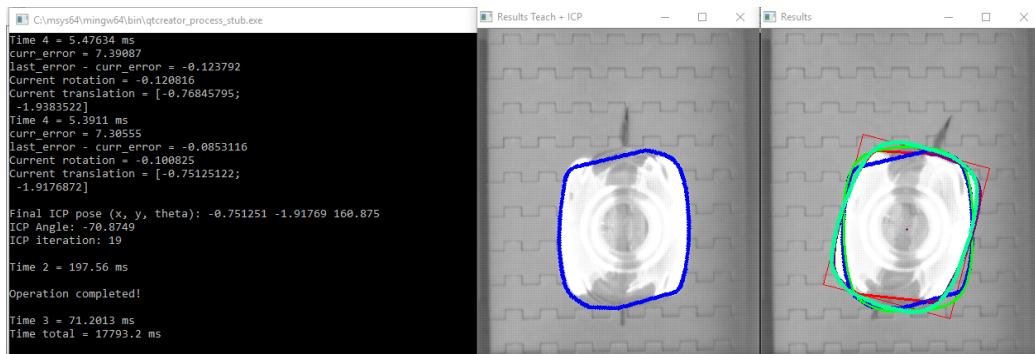


Figura 77 - Teste 1 - ICP normal para o ângulo de 20°, câmara PS3 Eye.



*Figura 78 - Teste 2 - ICP sem pontos centrais no modelo para o ângulo de 20°, câmara PS3 Eye.*

Analisando os novos dados obtidos com a câmara PS3 Eye verifica-se que tal como com a câmara uEye da IDS no teste retirando os pontos centrais dos modelos se obtém um valor de erro e tempo de execução do algoritmo mais baixos.

#### 5.1.4. Câmara topo, IDS VS Webcam

---

Dada a necessidade de trocar a câmara de topo com a câmara lateral, face ao projetado inicialmente, optou-se por realizar novos testes para confirmar os resultados obtidos inicialmente.

Após efetuar os testes do ICP (5.1.3 ICP) verificou-se que os resultados obtidos pelas duas câmaras eram coincidentes (Tabela 7 e Tabela 8) apesar de tanto a média dos erros obtidos como o maior valor de erro serem maiores com a câmara PS3 Eye, ainda assim os valores obtidos são considerados aceitáveis.

Apesar de esta troca entre as duas câmaras ser inevitável devido as características técnicas apresentadas pela câmara PS3 Eye, o facto de a câmara da IDS ficar posicionada lateralmente revela-se vantajoso devido ao maior detalhe que as imagens captadas apresentam, sendo uma vantagem na deteção de gravuras no corpo da garrafa.

## 5.1.5. Filtros Imagem Lateral

O objetivo do algoritmo da câmara lateral passa pela análise do corpo da garrafa e verificação da existência de gravura. A detecção da gravura deve ser feita quando esta se encontra virada para a câmara lateral, e a não detecção de gravura deve ser feita quando esta está virada para o lado oposto à câmara lateral.

Relativamente ao pré-processamento da imagem captada pela câmara lateral e a aplicação de um filtro de detecção de arestas, o primeiro teste foi através da utilização de um filtro *Canny*, com o objetivo de contar os pixéis brancos presentes na imagem.

No entanto tal como se pode ver na Figura 79 apesar de nas imagens a garrafa estar rodada 90° relativamente uma à outra, o número de pixéis brancos contados é bastante próximo em ambos os casos, tornando difícil a análise dos dados adquiridos para a distinção de hipóteses. Outra situação desfavorável à aplicação do filtro de *Canny* é o facto de este ser um filtro pesado em comparação com outros algoritmos de detecção de arestas.

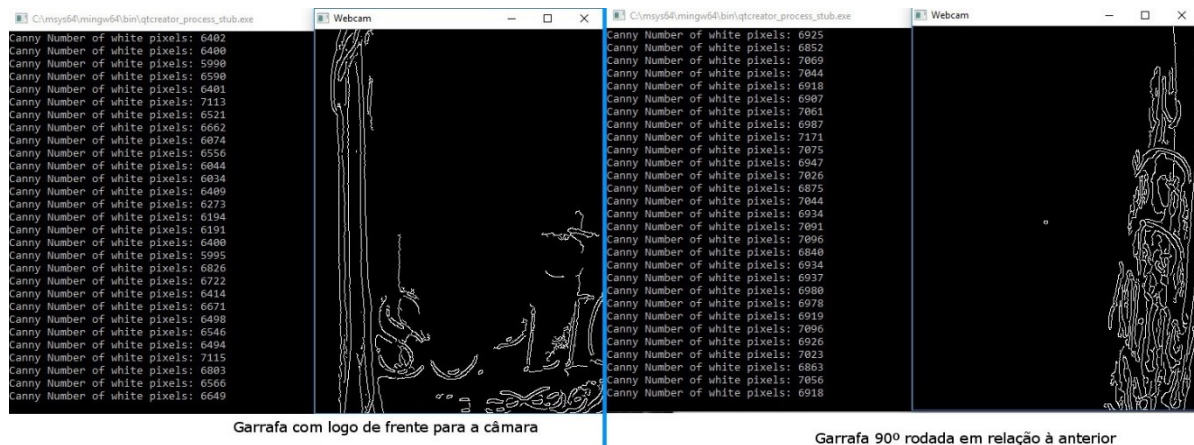


Figura 79 - Testes câmara lateral e filtro Canny.

Posto isto foram testados outros três filtros de detecção de arestas, filtro *Sobel*, filtro *Schaar* e filtro *Laplacian*. Aos filtros *Sobel* e *Schaar* foi retirada a componente do gradiente em X de modo a minimizar os efeitos das arestas laterais da garrafa, obtendo os resultados ilustrados na Figura 80 [48].

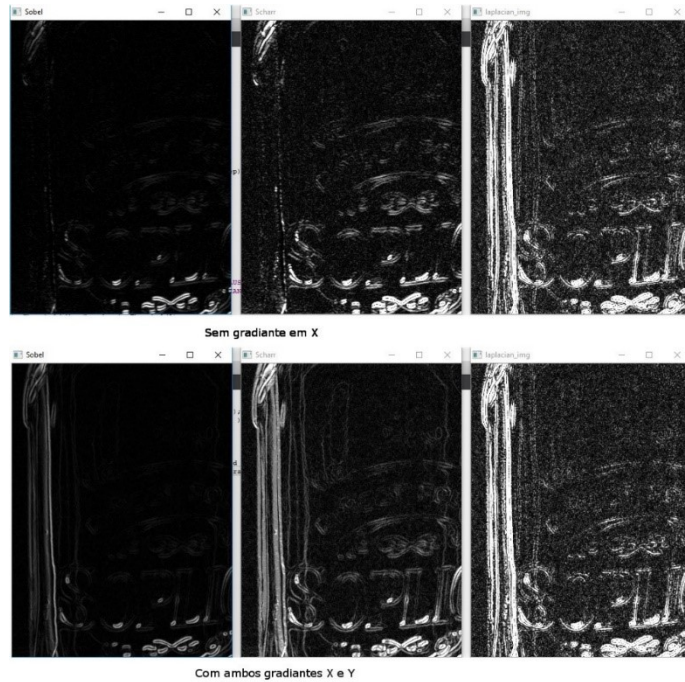
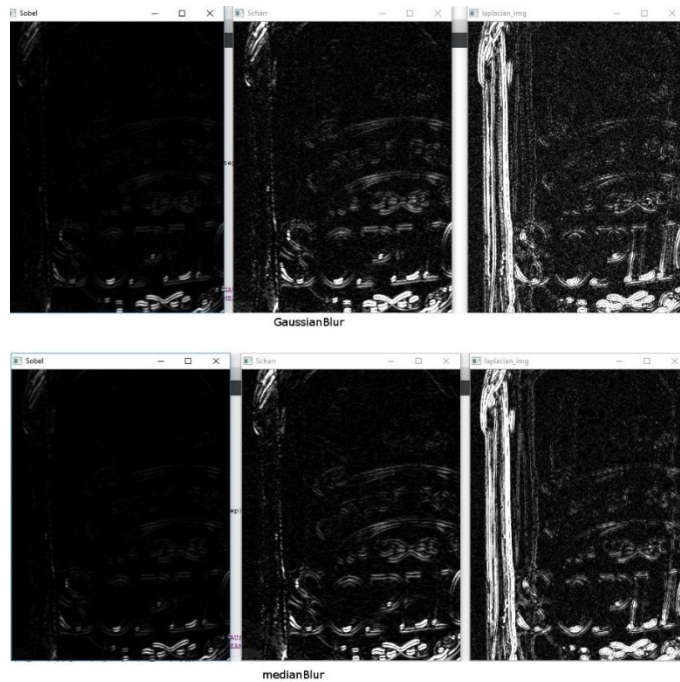


Figura 80 - Aplicação do filtro Sobel (sem e com gradiente em x), Scharr (sem e com gradiente em x) e Laplaciano.

Foi testada ainda a aplicação de um filtro para suavização da imagem logo após a sua aquisição, antes de se aplicar os filtros de detecção de arestas. Para isso foram testados dois filtros diferentes o *GaussianBlur* e o *MedianBlur*.

Os resultados obtidos (Figura 81) mostram que existe uma melhoria relativamente à imagem sem a aplicação destes filtros (Figura 80). Os resultados do *GaussianBlur* e o *MedianBlur* são bastante idênticos, tendo-se optado pela utilização do *GaussianBlur* por ser mais rápido.



*Figura 81 - Resultados da aplicação de filtro para suavizar a imagem captada.*

Ao longo dos testes efetuados verificou-se que mesmo estando no lado oposto à câmara, as gravuras tinham bastantes contornos a ser detetados. Esta constatação levou a testar se com o painel onde se encontra a câmara desligado se obtinha melhores resultados. Analisando as imagens captadas (Figura 82) verifica-se que apesar de com mais iluminação se identificarem melhor os contornos, o valor dos pixéis associado a cada coluna aumenta na mesma proporção relativamente ao teste efetuado com o painel desligado. Com este teste concluiu-se que seria indiferente captar a imagem lateral com o painel da câmara ligado ou desligado, optando-se assim por o manter permanentemente ligado (dado ser necessário para a câmara de topo).

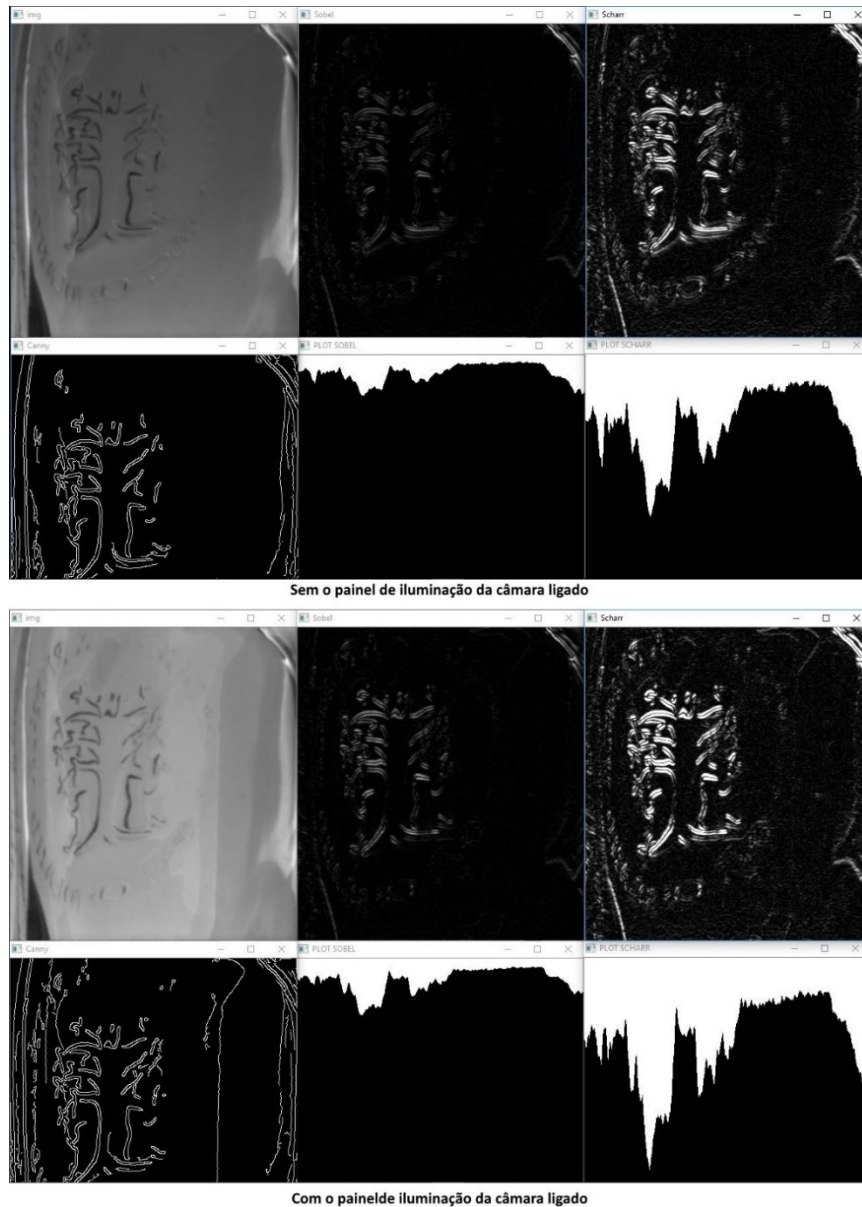


Figura 82 - Teste com painel de iluminação da câmara a) desligado b) ligado.

Como é possível verificar através dos testes efetuados, os resultados dos filtros testados são muito idênticos (Figura 83), tendo a escolha do filtro a aplicar sido feita comparando a velocidade de processamento de cada um dos filtros. Após três testes sequenciais verificou-se que o filtro mais rápido seria o *Sobel* (ver Tabela 9), sendo deste modo o selecionado a usar no algoritmo desenvolvido.

Tabela 9 - Velocidade de processamento de cada um dos filtros.

	Tempo Teste 1 (ms)	Tempo Teste 2 (ms)	Tempo Teste 3 (ms)
<i>Scharr</i>	0,782716	1,72028	1,67699
<i>Sobel</i>	0,639917	0,691235	0,674724
<i>Laplacian</i>	2,86356	3,05143	2,98985

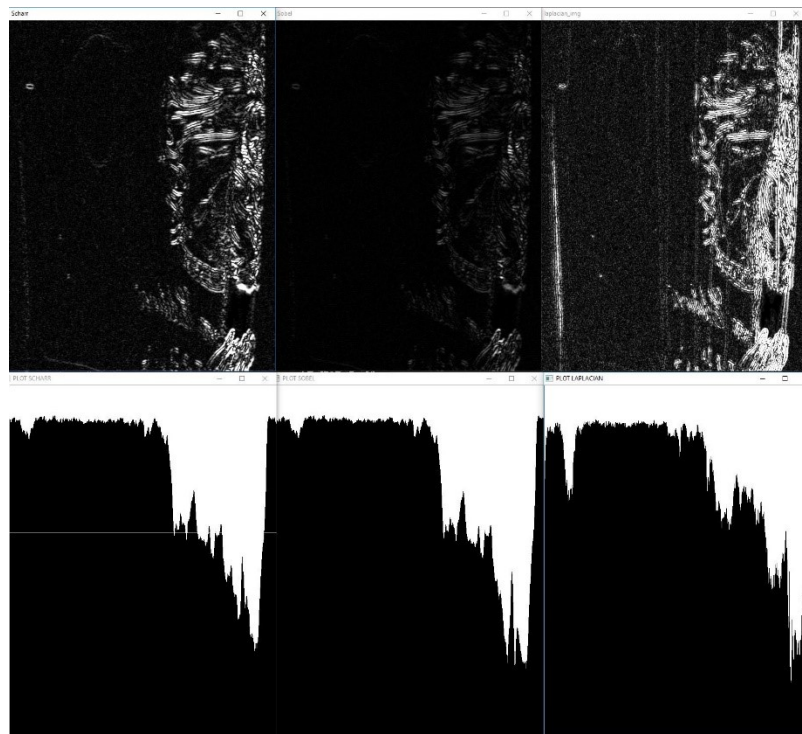


Figura 83 - Análise do resultado dos filtros.

Após a escolha do filtro *Sobel* analisaram-se os gráficos obtidos para as diversas posições das garrafas. Depois da análise dos vários dados recolhidos foram efetuados diversos cálculos de forma a ser possível distinguir para que lado a gravura da garrafa está direcionada.

Das métricas calculadas através do gráfico, foram selecionadas a posição do maior pico em X e a quantidade de pixéis brancos do gráfico.

Tal como referido no subcapítulo 4.2.2 (Construção do gráfico e análise dos dados) o gráfico é construído através da soma do valor de todos os pixéis, cada coluna do gráfico corresponde à soma do valor de todos os pixéis da coluna correspondente da imagem com o filtro *Sobel*.

Na Tabela 10 são apresentados os valores de pico em X e do número de pixéis brancos, obtidos através dos gráficos para as garrafas e ângulos de orientação descritos. São também apresentadas as mesmas métricas mas com valores normalizados. Tal como referido no subcapítulo 4.2.2 Câmara Lateral (Construção do gráfico e análise dos dados), para valores obtidos pela câmara de topo entre  $-20^\circ$  e  $20^\circ$  a métrica usada será o número de pixéis brancos (Peso Pixéis Brancos da Tabela 10). Para as restantes orientações será usada a métrica do pico em X (Peso Pico da Tabela 10). De recordar que os valores obtidos pela câmara de topo apenas variam entre  $-90^\circ$  e  $90^\circ$  e que será através destas métricas agora apresentadas que será calculado o valor real do ângulo que poderá vir com erro de  $180^\circ$ .

*Tabela 10 - Dados e resultados da análise dos gráficos de três garrafas distintas e para várias posições de orientação.*

Garrafa 1 (Retangular)											
Testes (ângulos)		$-120^\circ$	$-90^\circ$	$-70^\circ$	$-20^\circ$	$0^\circ$	$60^\circ$	$90^\circ$	$110^\circ$	$160^\circ$	$180^\circ$
Gráfico Sobel	Pico em X (Px)	438	363	496	533	0	15	78	23	19	244
	N.º Pixéis Brancos (Pb)	82844	69490	55798	92925	75456	92753	61129	76260	64145	52813
	Valor normalizado Px	0,7964	0,6600	0,9018	0,9691	0,0000	0,0273	0,1418	0,0418	0,0345	0,4436
	Valor normalizado Pb	0,7299	0,4331	0,1288	0,9539	0,5657	0,9501	0,2473	0,5836	0,3143	0,0625
	Peso Pico X	1	1	1	0	0	1	1	1	0	0
	Peso Pixéis Brancos	0	0	0	1	1	0	0	0	1	1
	Resultado	<b>0,7964</b>	<b>0,6600</b>	<b>0,9018</b>	<b>0,9539</b>	<b>0,5657</b>	<b>0,0273</b>	<b>0,1418</b>	<b>0,0418</b>	<b>0,3143</b>	<b>0,0625</b>

Garrafa 2 (Oval pequena)											
Testes (ângulos)		$-120^\circ$	$-90^\circ$	$-70^\circ$	$-20^\circ$	$0^\circ$	$60^\circ$	$90^\circ$	$110^\circ$	$160^\circ$	$180^\circ$
Gráfico Sobel	Pico em X (Px)	407	427	452	411	503	182	142	201	538	511
	N.º Pixéis Brancos (Pb)	86139	69043	76324	127184	114694	113427	67445	74224	90817	81470
	Valor normalizado Px	0,7400	0,7764	0,8218	0,7473	0,9145	0,3309	0,2582	0,3655	0,9782	0,9291
	Valor normalizado Pb	0,3252	0,0622	0,1742	0,9567	0,7645	0,7450	0,0376	0,1419	0,3972	0,2534
	Peso Pico X	1	1	1	0	0	1	1	1	0	0
	Peso Pixéis Brancos	0	0	0	1	1	0	0	0	1	1
	Resultado	<b>0,7400</b>	<b>0,7764</b>	<b>0,8218</b>	<b>0,9567</b>	<b>0,7645</b>	<b>0,3309</b>	<b>0,2582</b>	<b>0,3655</b>	<b>0,3972</b>	<b>0,2534</b>

Garrafa 3 (D Shape)											
Testes		$-120^\circ$	$-90^\circ$	$-70^\circ$	$-20^\circ$	$0^\circ$	$60^\circ$	$90^\circ$	$110^\circ$	$160^\circ$	$180^\circ$
Gráfico Sobel	Pico em X (Px)	511	510	502	483	440	74	40	59	128	136
	N.º Pixéis Brancos (Pb)	81470	96088	85946	142399	169058	104140	77668	99791	82916	84719
	Valor normalizado Px	0,9291	0,9273	0,9127	0,8782	0,8000	0,1345	0,0727	0,1073	0,2327	0,2473
	Valor normalizado Pb	0,1147	0,2609	0,1595	0,7240	0,9906	0,3414	0,0767	0,2979	0,1292	0,1472
	Peso Pico X	1	1	1	0	0	1	1	1	0	0
	Peso Pixéis Brancos	0	0	0	1	1	0	0	0	1	1
	Resultado	<b>0,9291</b>	<b>0,9273</b>	<b>0,9127</b>	<b>0,7240</b>	<b>0,9906</b>	<b>0,1345</b>	<b>0,0727</b>	<b>0,1073</b>	<b>0,1292</b>	<b>0,1472</b>

De forma a tornar os resultados mais claros são apresentados nas Figura 84, Figura 85 e Figura 86 os gráficos dos resultados detalhados na Tabela 10.

Para os ângulos em que a métrica utilizada é o número de pixéis brancos (linha vermelha) é possível constatar através da análise dos gráficos que para os ângulos de 20°, 0° os valores de pixéis brancos no gráfico estão a cima de 0,5 e em sentido contrário para os ângulos de 160° e 180° está abaixo de 0,5. Isto significa que para o primeiro caso apresentado a garrafa está com a gravura virada para a câmara e no segundo caso está com a gravura virada para o lado oposto à câmara.

Para os restantes ângulos é utilizado o valor de pico em X (linha azul) para distinguir para que lado a garrafa está virada. As orientações obtidas pela câmara de topo estão corretas para os ângulos com valores entre 0° e -90° (-90° e -70° da tabela) e resultados de pico em X a cima de 0,5, e para os ângulos com valores entre 0° e 90° (60° e 90° da tabela), com resultados de pico em X abaixo de 0,5. Para ângulos obtidos pela câmara de topo entre 0° e 90° (-120° da tabela) e resultados de pico em X superiores a 0,5 o ângulo obtido está -180° desfasado. Para ângulos entre 0° e -90° (110° e 160° da tabela) e resultados de pico em X inferiores a 0,5 os valores de ângulo está desfasado +180°.

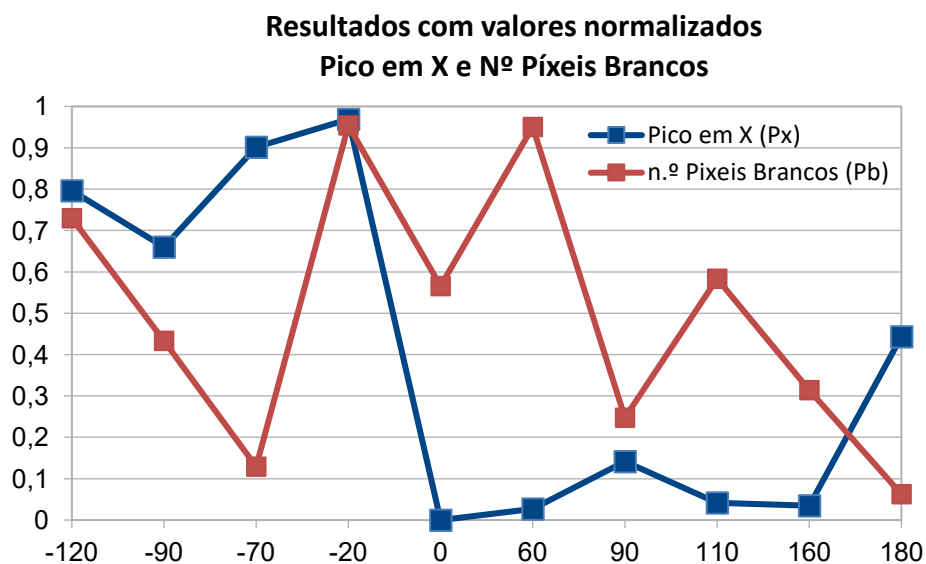


Figura 84- Garrafa 1 - Pico em X e N.º pixéis brancos (valores normalizados).

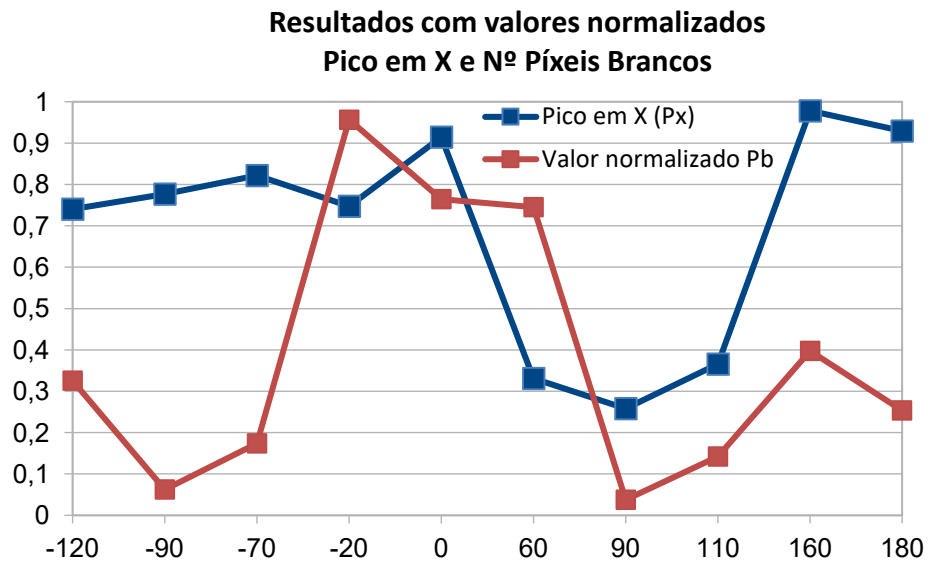


Figura 85 - Garrafa 2 - Pico em X e N.º píxeis brancos (valores normalizados).

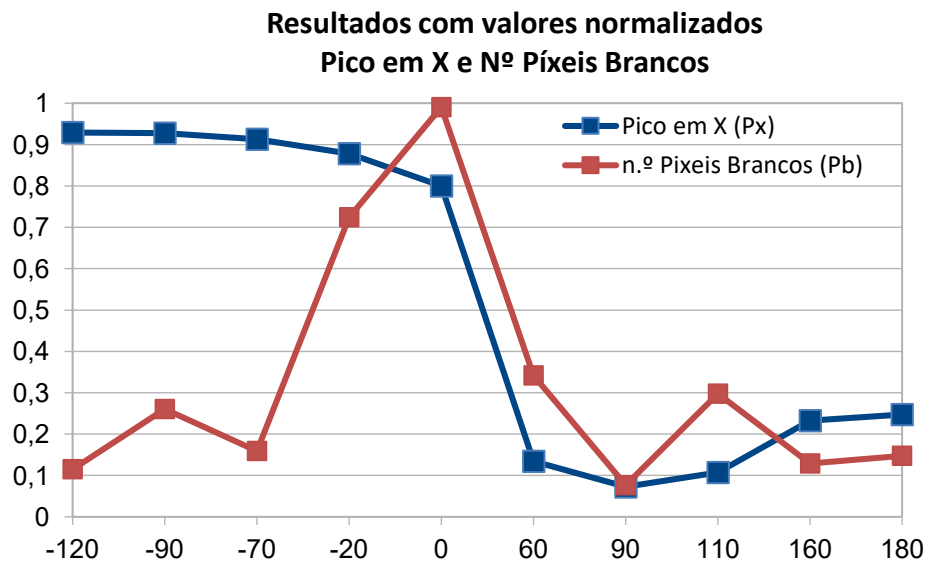


Figura 86 - Garrafa 3 - Pico em X e N.º píxeis brancos (valores normalizados).

## 5.2. Validação do Sistema

---

De modo a validar todo o comportamento do algoritmo e a sua eficiência, este foi submetido a diversos testes adicionais com o algoritmo completo.

### 5.2.1. Testes com as duas Câmaras e Garrafa Estática

---

Os primeiros testes de validação foram feitos ao algoritmo em si, de forma a verificar se todos os cálculos e a troca de informação entre os algoritmos das duas câmaras foram bem executados. Estes testes foram efetuados com a garrafa estática, sendo alinhada com as câmaras manualmente. Na Tabela 11,

Tabela 12 e Tabela 13 são apresentados os resultados obtido através dos testes a três garrafas de amostra diferentes. Para cada garrafa foram realizados vinte e quatro ensaios com valores de orientação inicial diferentes.

Nos testes apresentados considerou-se apenas o algoritmo de processamento para garrafas do tipo A, usando a câmara de topo e a câmara lateral. Apesar disso foi utilizada também nestes testes a garrafa *D shape* que é do tipo B.

Tabela 11 - Testes com as duas Câmaras e garrafa 1 (Retangular) estática.

Garrafa 1 (Retangular)								
Teórico	-170°	-160°	-140°	-120°	-100°	-90°	-80°	-60°
Ângulo Retângulo	4,7146°	12,9946°	39,2894°	63,435°	82,2348°	88,53,12°	-82,2782°	-64,9831°
Ângulo ICP	8,75508°	18,1695°	39,0187°	62,7124°	81,1207°	88,1547°	-81,6738°	-64,0739°
Ângulo Final	-171,245°	-161,831°	-140,981°	-117,288°	-98,8793°	-91,8453°	-81,6768°	-64,0739°
Erro	1,245°	1,831°	0,981°	-2,712°	-1,1207°	1,8453°	1,6768°	4,0739°
Teórico	-40°	-20°	-10°	0°	10°	20°	40°	60°
Ângulo Retângulo	-41,1859°	-21,0375°	-10,5392°	0°	6,18861°	19,98,31°	41,4237°	65,556°
Ângulo ICP	-42,5071°	-22,7417°	-10,9801°	-0,0165°	10,4943°	21,548°	41,4807°	61,9714°
Ângulo Final	-42,5071°	-22,7417°	-10,9801°	-0,0165°	10,4943°	21,548°	41,4807°	61,9714°
Erro	2,5071°	2,7417°	0,9801°	0,0165°	-0,4943°	-1,548°	-1,4807°	-1,9714°
Teórico	80°	90°	100°	120°	140°	160°	170°	180°
Ângulo Retângulo	80,352°	90°	-81,1354°	-74,876°	-45°	-19,9831°	-9,4623°	-1,16913°
Ângulo ICP	79,3678°	89,0761°	-80,5769°	-66,1775°	-45,2194°	-21,2172°	-11,0195°	-1,88675°
Ângulo Final	79,3678°	89,0761	99,4231°	113,823°	134,781°	158,783°	168,98°	178,113°
Erro	0,6322°	0,9239°	0,5769°	6,177°	5,219°	1,217°	1,02°	1,887°

Tabela 12 - Testes com as duas Câmaras e garrafa 2 (Oval pequena) estática.

Garrafa 2 (Oval pequena)								
Teórico	-170°	-160°	-140°	-120°	-100°	-90°	-80°	-60°
Ângulo Retângulo	-18,435°	-4,3987°	3,17983°	21,8014°	90°	90°	81,8699°	-80,5377°
Ângulo ICP	11,2867°	19,3739°	46,027°	63,4208°	84,191°	91,1218°	101,591°	-62,129°
Ângulo Final	-168,713°	-160,626°	-133,973°	-116,579°	-95,809°	-88,8782°	-78,409°	-62,129°
Erro	-1,287°	0,626°	-6,027°	-3,421°	-4,191°	-1,1218°	-1,591°	2,129°
Teórico	-40°	-20°	-10°	0°	10°	20°	40°	60°
Ângulo Retângulo	-63,435°	0°	6,34018°	-21,8014°	-11,3099°	-6,1155°	90°	78,6901°
Ângulo ICP	-41,162°	-15,3378°	-8,56511°	0,660232°	11,3864°	19,9547°	51,7627°	66,9295°
Ângulo Final	-41,162°	-15,3378°	-8,56511°	0,660232°	11,3865°	19,9547°	51,7627°	66,9295°
Erro	1,162°	-4,6622°	-1,43489°	-0,660232°	-1,3865°	0,0453°	-11,7627°	-6,9295°
Teórico	80°	90°	100°	120°	140°	160°	170°	180°
Ângulo Retângulo	90°	-87,7974°	-87,5104°	-85,2363°	-67,1663°	-4,76365°	0°	-18,435°
Ângulo ICP	82,8762°	-87,3543°	-80,0152°	-66,6878°	-46,6071°	-12,6758°	-4,91076°	-1,48094°
Ângulo Final	82,8762°	92,6457°	99,9848°	113,312°	133,393°	167,324°	175,089°	178,519°
Erro	-2,8762°	-2,6457°	0,0152°	6,688°	6,607°	-7,324°	-5,089°	1,481°

Tabela 13 - Testes com as duas Câmaras e garrafa 3 (D Shape) estática.

Garrafa 3 (D Shape)								
Teórico	-170°	-160°	-140°	-120°	-100°	-90°	-80°	-60°
Ângulo Retângulo	4,51399°	17,354°	38,6598°	63,435°	80,5377°	88,9053°	-81,3844°	-70,4269°
Ângulo ICP	4,35675°	18,8551°	35,0999°	61,0939°	77,7384°	86,9283°	-81,9455°	-67,5499°
Ângulo Final	-175,643°	-161,145°	-144,9°	-118,906°	-102,262°	-93,0717°	-81,9455°	-67,8869°
Erro	5,643°	1,145°	4,9°	-1,094°	2,262°	3,0717°	1,9455°	7,8869°
Teórico	-40°	-20°	-10°	0°	10°	20°	40°	60°
Ângulo Retângulo	-42,7094°	-20,556°	-9,46233°	-0,716162°	6,34018°	18,4349°	40,6013°	60,6423°
Ângulo ICP	-42,6661°	-20,916°	-10,9265°	-1,9603°	8,11174°	19,3561°	40,8729°	62,4679°
Ângulo Final	-42,6661°	-20,916°	-10,9265°	-1,9603°	8,11174°	19,3561°	40,8729°	62,4679°
Erro	2,6661°	0,916°	0,9265°	1,9603°	1,88826°	0,6439°	-0,8729°	-2,4679°
Teórico	80°	90°	100°	120°	140°	160°	170°	180°
Ângulo Retângulo	82,6004°	90°	-81,5596°	-63,435°	-36,8699°	-16,6992°	-7,12502°	0°
Ângulo ICP	80,7379°	89,8771°	-83,3574°	-71,5273°	-42,9578°	-21,7393°	-10,7425°	-2,64988°
Ângulo Final	80,7379°	89,8771°	96,6426°	108,473°	137,042°	158,261°	169,258°	177,35°
Erro	-0,7379°	0,1229°	3,3574°	11,527°	2,958°	1,739°	0,742°	2,65°

Analisando os dados das tabelas apresentadas é possível verificar que no caso da garrafa 1 apenas houve um ensaio que deu um erro superior a 6°, para a garrafa 2 houve 6 já no caso da garrafa 3 houve 2 ensaios que deram valores de erro superiores a 6°.

A média de erro no caso da garrafa 1 foi de 1,87°, na garrafa 2 foi de 3,38° e na garrafa 3 foi de 2,67°. Estes valores obtidos podem-se considerar valores dentro do pretendido. O facto de a garrafa ser posicionada manualmente numa orientação específica em cada um dos ensaios realizados, pode introduzir algum erro no valor teórico de orientação justificando desta forma alguns valores de erro mais elevados.

Da Figura 87 à Figura 92 são apresentados os resultados das três amostras de garrafas existentes, cada uma para duas orientações diferentes, primeiro para 160° e segundo para -40°. Nestas figuras é apresentada em primeiro lugar a imagem captada pela câmara de topo, seguindo-se o respetivo gráfico com o peso dos pixéis resultantes do filtro *sobel*. De seguida é apresentada a imagem captada referente à câmara de topo e por último os respetivos resultados do algoritmo da câmara de topo (*convex hull*, ICP e mínimo retângulo)

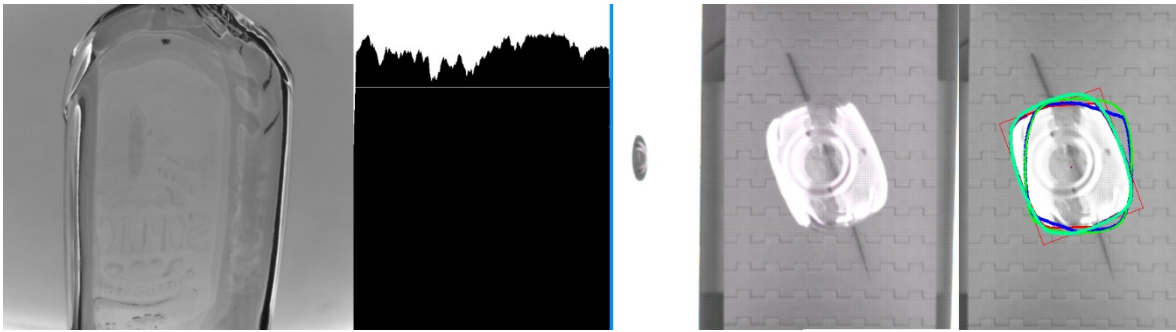


Figura 87 - Teste com duas câmaras garrafa 1 ângulo 160°.

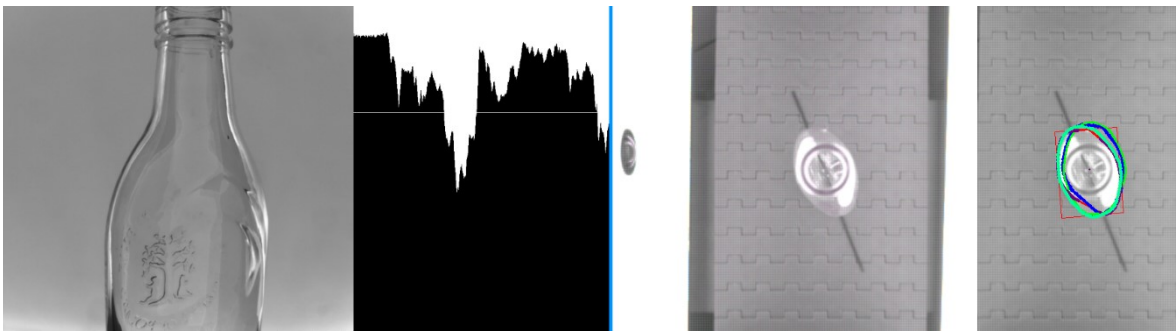


Figura 88 - Teste com duas câmaras garrafa 2 ângulo 160°.

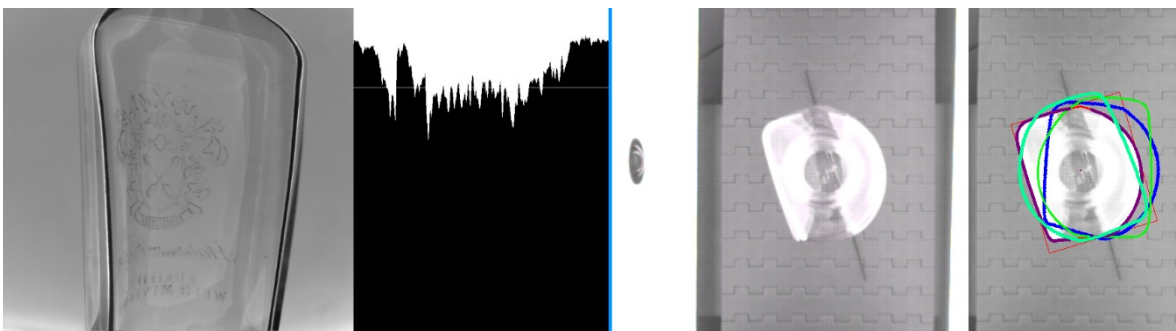


Figura 89 - Teste com duas câmaras garrafa 3 ângulo 160°.

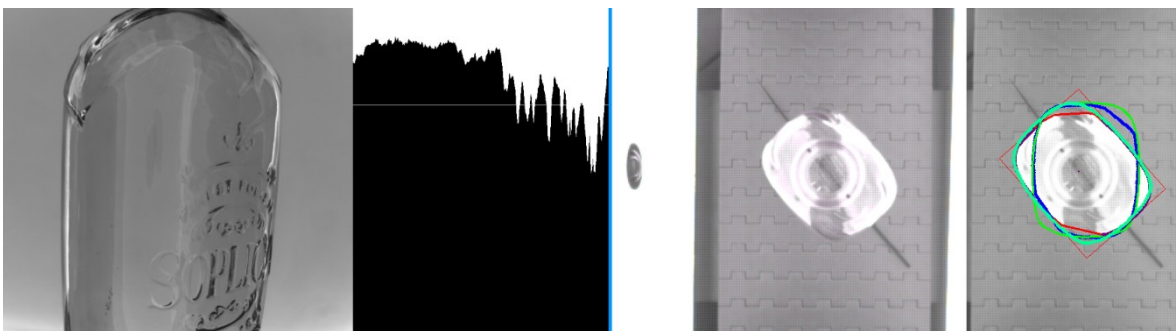


Figura 90 - Teste com duas câmaras garrafa 1 ângulo -40°.

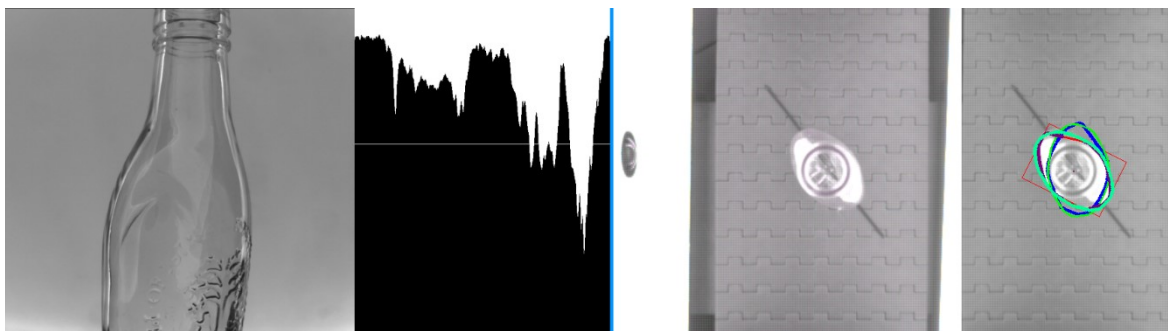


Figura 91 - Teste com duas câmaras garrafa 2 ângulo -40°.

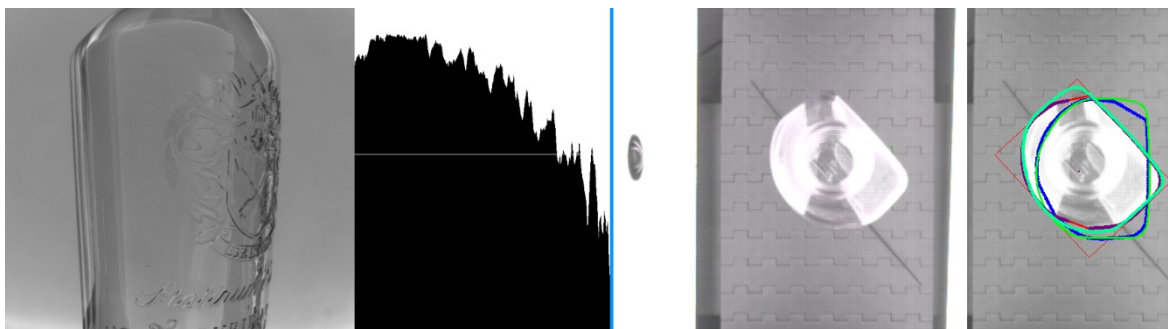


Figura 92 - Teste com duas câmaras garrafa 3 ângulo -40°.

## 5.2.2. Testes com as duas Câmaras e Garrafa em Movimento

---

Neste subcapítulo são apresentados os testes com a garrafa em movimento de forma a provar que o conceito apresentado é funcional. Os testes foram repetidos quatro vezes para catorze orientações diferentes, tendo sido utilizadas três garrafas de amostra diferentes. Os resultados obtidos são apresentados na Tabela 14, Tabela 15 e Tabela 16.

A garrafa é colocada no início do transportador que se encontra a funcionar a 0,24 m/s (14 m/min). Ao passar pela fotocélula à entrada da estrutura é dado o sinal de *trigger* que inicia a captura de imagens e processamento dos algoritmos. Tal como nos testes com garrafa estática aqui também foi introduzida a garrafa D *shape* que é do tipo B.

Tabela 14 - Teste com duas câmaras e garrafa 1 (Retangular) em movimento

Teórico	-140°	-110°	-90°	-80°	-45°	-30°	0°
Teste 1	-143,74°	-111,052°	-88,07°	-82,18°	-40,76°	-27,82°	3°
Teste 2	-140,61°	-103,29°	-91,75°	-80,32°	-43,43°	-30,27°	-3,6°
Teste 3	-133,63°	-107,18°	-92,12°	-84,17°	-39,83°	-33,56°	-4,17°
Teste 4	-137,91°	70,9°	-92,53°	-84,69°	-40,7°	-32,75°	-3,09°
Teórico	45°	70°	90°	110°	140°	150°	180°
Teste 1	40,57°	67,55°	90,85°	111,03°	138,1°	155,79°	179,14°
Teste 2	48,04°	74,94°	85,82°	105,22°	-23,59°	152,45°	175,5°
Teste 3	48,59°	74,3°	-89,26°	103,42°	142,04°	150,31°	179,6°
Teste 4	48,5°	65,62°	87,43°	113,54°	146,71°	-28,11°	178,212°

Tabela 15 - Teste com duas câmaras e garrafa 2 (Oval pequena) em movimento

Teórico	-140°	-110°	-90°	-80°	-45°	-30°	0°
Teste 1	-138,41°	-112,84°	-96,88°	-76,16°	-43,49°	-31,98°	-5,24°
Teste 2	-119,19°	-107,11°	-90,53°	-71,69°	-55,21°	-25,18°	-3,69°
Teste 3	-147,63°	-109,05°	-92,08°	-66,28°	-45,99°	-23,32°	0,93°
Teste 4	-148,50°	-132,04°	-92,75°	-74,28°	-51,37°	25,47°	-12,05°
Teórico	45°	70°	90°	110°	140°	150°	180°
Teste 1	48,43°	73,9°	81,83°	103,42°	149,03°	-23,39°	-169,87°
Teste 2	43,83°	63,77°	87,27°	-52,76°	146,34°	160,63°	-173,6
Teste 3	-149,09°	-110,45°	91,62°	-62,04°	134,67°	165,19°	174,1°
Teste 4	31,01°	81,29°	98,55°	114,55°	130,91°	159,35°	-172,6°

Tabela 16 - Teste com duas câmaras e garrafa 3 (D Shape) em movimento

Teórico	-140°	-110°	-90°	-80°	-45°	-30°	0°
Teste 1	-146,25°	-111,2°	-84,77°	-76,71°	-45,34°	-21,24°	-0,04°
Teste 2	-136,75°	-111,19°	-92,66°	-80,68°	-39,75°	-30,27°	1,11°
Teste 3	-143,99°	110,11°	-91,62°	96,96°	-45,38°	-39,3°	-0,15°
Teste 4	-139,20°	-104,4°	-87,94°	-84,69°	-43,12°	-31,75°	-0,09°
Teórico	45°	70°	90°	110°	140°	150°	180°
Teste 1	41,33°	75,38°	89,99°	111,36°	140,05°	-34,16°	-179,17°
Teste 2	47,08°	76,14°	90,4°	110,29°	138,12°	146,17°	178,76°
Teste 3	42,84°	-111,4°	89,62°	109,45°	144,09°	159,85°	177,71°
Teste 4	53,33°	74,98°	92,95°	102,61°	143,94°	153,65°	178,73°

Os valores de rotação que foram mal identificados pela câmara lateral estão a vermelho e os valores de rotação obtidos pelo ICP com mais de 10° de diferença do valor teórico a castanho. É necessário focar que na realização destes testes as garrafas foram colocadas à

mão no transportador nas posições de rotação teóricas, introduzindo logo à partida um erro inicial. A identificação incorreta da garrafa pela câmara lateral pode ficar a dever-se a variações de velocidade do tapete que se traduziam na captura de imagem fora do ROI definido. O objetivo deste teste foi perceber se com a garrafa em movimento era possível, captar as imagens e calcular os ângulos de rotação necessários.

Analisando os dados das tabelas apresentadas verifica-se que, para o caso da garrafa 1, obteve-se uma taxa de sucesso de 92.9%, para a garrafa 2, obteve-se uma taxa de sucesso de 83% (contando com os maus valores de ICP), e no caso da garrafa 3 obteve-se uma taxa de sucesso de 94.64%. No geral somando os três resultados o sistema apresenta uma validação para 90,5% dos casos.

Da Figura 93 à Figura 98 são apresentados exemplos dos resultados obtidos através dos testes efetuados. À direita de cada figura está a imagem captada pela câmara lateral seguindo o gráfico resultante da soma do valor de cada píxel por coluna. Mais à direita encontram-se a imagem captada pela câmara de topo, e a imagem com os resultados de *debug*, respetivamente.

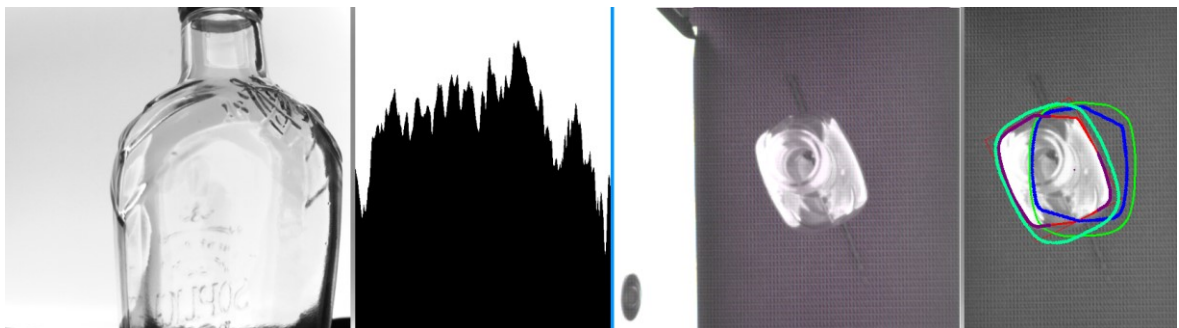


Figura 93 - Teste com garrafa 1 em movimento e 140° de rotação.

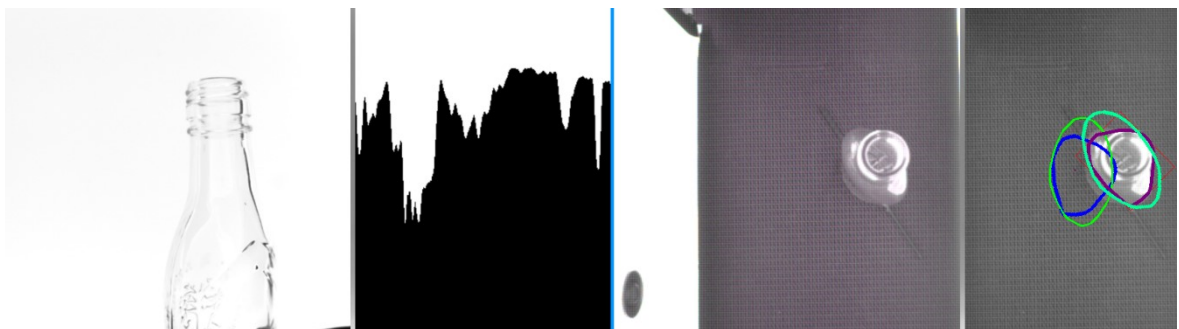
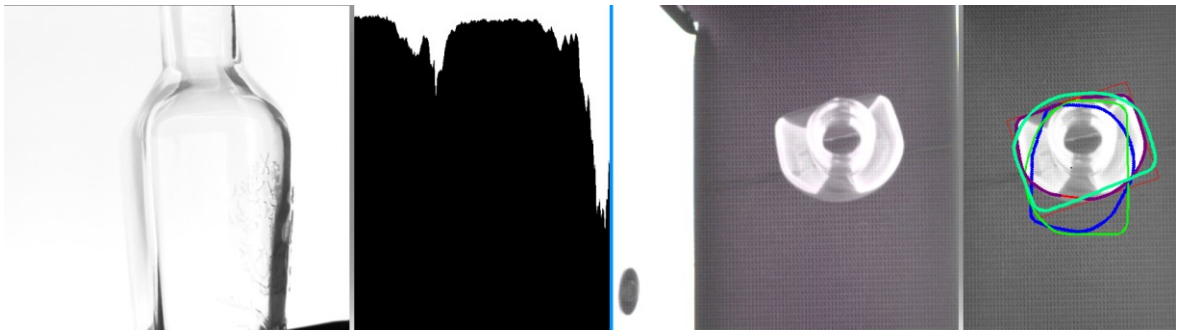
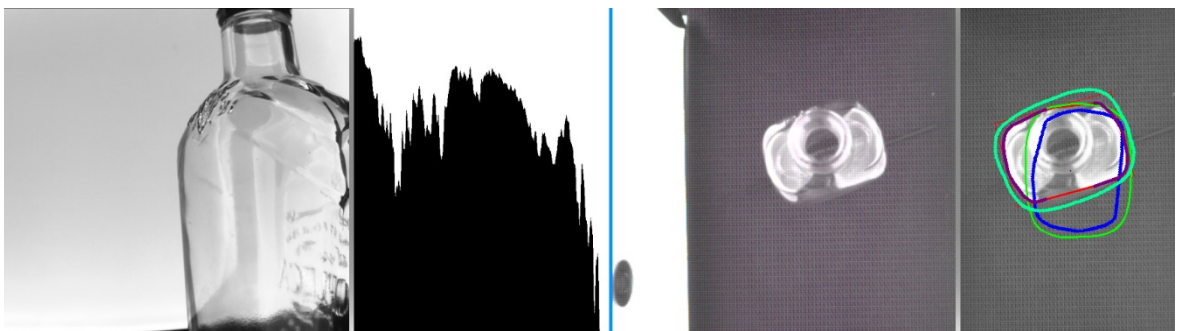


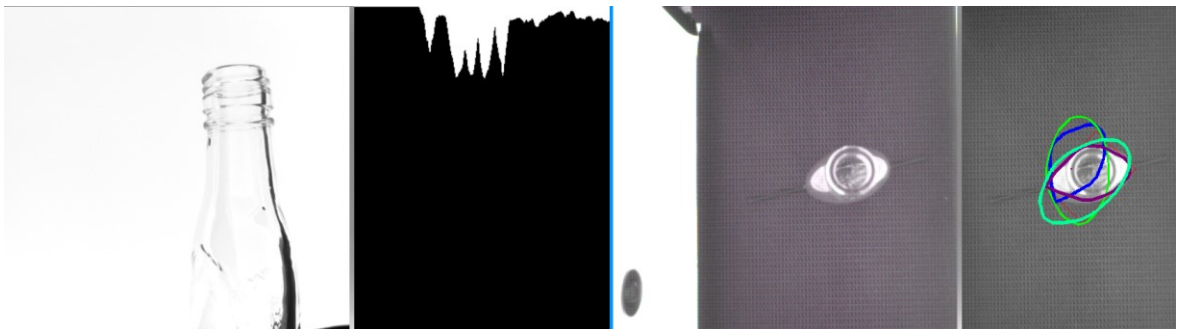
Figura 94 - Teste com garrafa 2 em movimento e 140° de rotação.



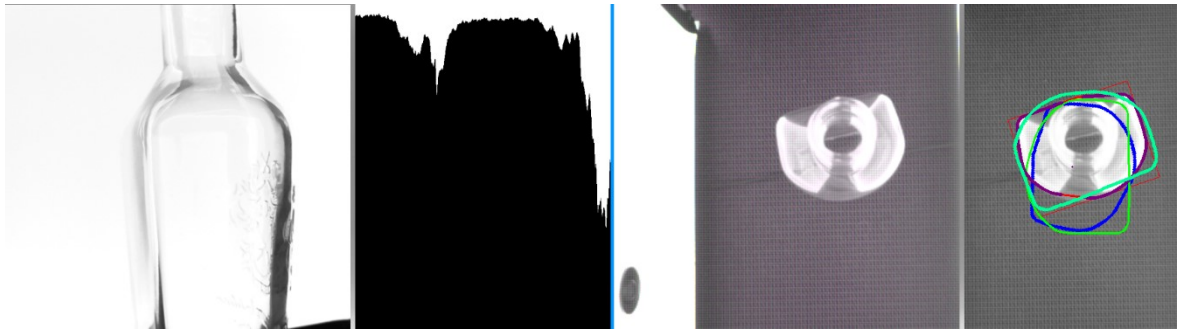
*Figura 95 - Teste com garrafa 3 em movimento e 140° de rotação.*



*Figura 96 - Teste com garrafa 1 em movimento e -110° de rotação.*



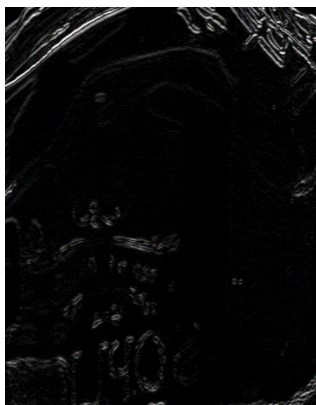
*Figura 97 - Teste com garrafa 2 em movimento e -110° de rotação.*



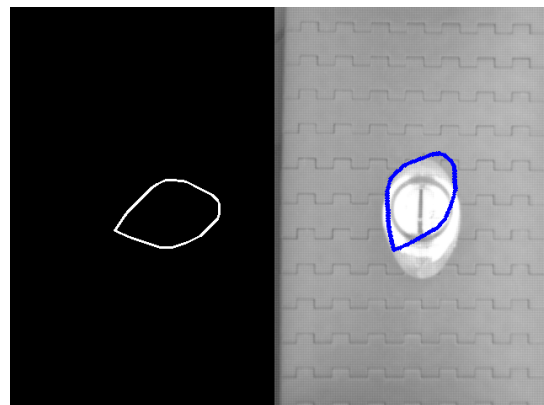
*Figura 98 - Teste com garrafa 3 em movimento e  $-110^\circ$  de rotação.*

Na Figura 93 (garrafa 1 para  $140^\circ$ ) é exemplificado um caso onde foi mal identificado pela câmara e algoritmo lateral o lado da garrafa. Esta situação ocorreu porque o ROI utilizado permitiu que fossem identificados muitos pixéis brancos na zona do ombro da garrafa, tal como mostra a Figura 99.

No teste apresentado pela Figura 97 (garrafa 2 para  $-110^\circ$ ) foi identificado pelo algoritmo da câmara de topo um valor diferente do esperado. No caso da garrafa 2 foram obtidos ângulos diferentes do esperado devido à má identificação do modelo, tal como mostra a Figura 100. Isto acontece porque além da garrafa ser pequena não é possível aproximar a câmara da garrafa.



*Figura 99 - Teste com garrafa 1 em movimento e  $140^\circ$  de rotação, Resultado do Sobel.*



*Figura 100 - Teste com garrafa 2 em movimento e  $-110^\circ$  de rotação, Resultado do Convex Hull e ICP.*

### 5.2.3. Testes Finais sem Informação de *Debug*

Nestes testes pressupõem-se mostrar e validar a velocidade do algoritmo proposto e analisar se com este algoritmo é possível analisar pelo menos 150 garrafas por minuto, tal como proposto no início do projeto. Para isso foram efetuados quatro ensaios sem qualquer informação de *debug* a não ser a informação do tempo que os algoritmos demoraram a processar e o valor de rotação final. Essa informação é apresentada na Tabela 17.

Tabela 17 - Tempos de processamento do algoritmo sem *debug*.

	Teste 1 (0°)	Teste 2 (180°)	Teste 3 (50°)	Teste 4 (-70°)	Média
Garrafa 1	413,615	401,807	437,681	386,907	410,0025
Garrafa 2	522,743	466,169	405,612	411.752	451,569
Garrafa 3	423,49	400,875	371,857	409,069	401,3228
Média Total					<b>420,9648</b>

```
C:\Users\Filipe Caetano\Desktop\Projeto orientador\64\Release\Orientador_Online.exe
Operation completed!
Tempo inicializacao camara de topo (antes do trigger) = 293.599ms)
Tempo apenas do ICP = 280.022ms)
Tempo algoritmo de topo = 408.231ms)

ANGULO= -0.23815
Angulo Final = -0.23815
Tempo inicializacao camara lateral (antes do trigger) = 1412.62ms)
Tempo Algoritmo lateral(sem calculo final do angulo) = 381.015ms)
Tempo total algoritmo topo (visto pelo lateral) = 412.402ms)
Tempo total (deste o trigger ate calculo do angulo) = 413.615ms)
Completed!
```

Figura 101 - Teste sem *debug* para 0° garrafa 1 (Retangular) em movimento

```
C:\Users\Filipe Caetano\Desktop\Projeto orientador\64\Release\Orientador_Online.exe
Operation completed!
Tempo inicializacao camara de topo (antes do trigger) = 278.424ms)
Tempo apenas do ICP = 206.827ms)
Tempo algoritmo de topo = 462.3ms)

ANGULO= 6.20106
Angulo Final = -173.799
Tempo inicializacao camara lateral (antes do trigger) = 1415.06ms)
Tempo Algoritmo lateral(sem calculo final do angulo) = 376.843ms)
Tempo total algoritmo topo (visto pelo lateral) = 464.951ms)
Tempo total (deste o trigger ate calculo do angulo) = 466.169ms)
Completed!
```

Figura 102 - Teste sem *debug* para 180° garrafa 2 (Oval pequena) em movimento

```
C:\Users\Filipe Caetano\Desktop\Projeto orientador\64\Release\Orientador_Online.exe
Operation completed!
Tempo inicializacao camara de topo (antes do trigger) = 241.258ms)
Tempo apenas do ICP = 80.1927ms)
Tempo algoritmo de topo = 293.922ms)

ANGULO= 49.4449
Angulo Final = 49.4449
Tempo inicializacao camara lateral (antes do trigger) = 1409.73ms)
Tempo Algoritmo lateral(sem calculo final do angulo) = 371.251ms)
Tempo total algoritmo topo (visto pelo lateral) = 371.589ms)
Tempo total (deste o trigger ate calculo do angulo) = 371.857ms)
Completed!
```

Figura 103 - Teste sem *debug* para 50° garrafa 3 (D Shape) em movimento

```
C:\Users\Filipe Caetano\Desktop\Projeto orientador\64\Release\Orientador_Online.exe
Operation completed!
Tempo inicializacao camara de topo (antes do trigger) = 277.145ms)
Tempo apenas do ICP = 242.687ms)
Tempo algoritmo de topo = 317.616ms)

ANGULO= 107.341
Angulo Final = -72.659
Tempo inicializacao camara lateral (antes do trigger) = 1424.65ms)
Tempo Algoritmo lateral(sem calculo final do angulo) = 373.455ms)
Tempo total algoritmo topo (visto pelo lateral) = 374.785ms)
Tempo total (deste o trigger ate calculo do angulo) = 386.907ms)
Completed!
```

Figura 104 - Teste sem *debug* para -70° garrafa 1 (Retangular) em movimento

Analisando a Tabela 17 verifica-se que a média do tempo de execução do algoritmo (excetuando a inicialização das câmaras) é de 420,96 ms para correr todo o projeto. Com este tempo médio de execução é possível analisar 142 garrafas por minuto que é um valor bastante próximo do proposto.

## 5.2.4. Testes com Garrafa Tipo B

Comprovado funcionamento com a garrafa em movimento, selecionaram-se do teste com garrafa estática, os resultados com maior erro estimado. Selecionaram estes resultados porque o ângulo teórico previsto é mais próximo do real. Neste teste executou-se um algoritmo específico para garrafas do tipo B, em que o algoritmo de ICP é executado duas vezes, com estimativas de rotação desfasadas 180°. Na Tabela 18 são apresentados os resultados obtidos.

Tabela 18 - Teste com garrafa tipo B (D shape)

Garrafa 3 (D Shape) - ICP 2xs								
Teórico	-170°	-160°	-140°	-120°	-100°	-90°	-80°	-60°
Angulo Retângulo	4,51399°	17,354°	38,6598°	63,435°	80,5377°	88,9053°	-81,3844°	-70,4269°
Angulo ICP	-173,571°	-161,46°	-140,96°	-116,62°	-99,58°	-90,88°	-82,01°	-68,41°
Erro absoluto	3,571°	1,46°	0,96°	3,38°	0,42°	0,88°	2,01°	8,41°
Teórico	-40°	-20°	-10°	0°	10°	20°	40°	60°
Angulo Retângulo	-42,7094°	-20,556°	-9,46233°	-0,71616°	6,34018°	18,4349°	40,6013°	60,6423°
Angulo ICP	-43,58°	-22,48°	-13,78°	-4,71°	10,57°	18,71°	40,96°	62,45°
Erro absoluto	3,58°	2,48°	3,78°	4,71°	0,57°	1,29°	0,96°	2,45°
Teórico	80°	90°	100°	120°	140°	160°	170°	180°
Angulo Retângulo	82,6004°	90°	-81,5596°	-63,435°	-36,8699°	-16,6992°	-7,12502°	0°
Angulo ICP	82,16°	89,69°	98,39°	116,79°	142,77°	162,49°	172,41°	180,43°
Erro absoluto	2,16°	0,31°	1,61°	3,21°	2,77°	2,49°	2,41°	0,43°

Analisando os dados apresentados verifica-se que houve apenas um ensaio em que o erro foi superior a 6°, e que a média de erro neste caso foi de 2,35°.

## 5.3. Considerações finais

---

Os testes realizados neste capítulo serviram para validar tanto as opções tomadas como o conceito apresentado.

Através dos testes efetuados verificou-se que o algoritmo de ICP funciona melhor com uma estimativa de rotação inicial próxima do valor real. Apesar de ser usada a câmara PS3 Eye os resultados obtidos foram satisfatórios, no entanto, a diferença entre os valores de rotação prático e real eram superiores aos dos apresentados com a câmara da IDS, sendo vantajoso a utilização de uma câmara industrial.

No caso dos testes efetuados com a garrafa estática, onde era mais fácil controlar o valor teórico de rotação da garrafa, os resultados práticos obtidos foram satisfatórios. Os testes com a garrafa em movimento revelaram ser possível aplicar o conceito apresentado, bem como o bom funcionamento das duas câmaras em paralelo com a utilização de *threads*. Quanto ao valor do tempo de execução do algoritmo, apesar de não permitir analisar 150 bpm chegou-se a um valor bastante próximo (142 bpm). Note-se que reduzindo o tempo de execução do algoritmo, de 0,42 segundos para 0,3 segundos, seria possível analisar 200 bpm, o que corresponderia a um aumento de produção de 40%. Este é um aumento considerável na capacidade de resposta, o que a nível industrial seria importante. De salientar que é possível melhorar a rapidez do algoritmo ao melhorar as condições de *hardware*, havendo ainda espaço para realizar otimizações relativamente ao código.

Para os testes efetuados para garrafas do tipo B, quando apenas foi usada a câmara de topo, houve apenas um ensaio com um erro superior a 6°, tendo o erro médio fica ligeiramente abaixo de quando foram usadas duas câmaras.

Nos testes com a garrafa em movimento foi usado um tapete flexível, quando em meio industrial são utilizados tapetes rígidos. A fotocélula foi aplicada na entrada da estrutura, sendo necessário adicionar um atraso à captura através de um *trigger* por *software*. Num protótipo final seria necessário receber a informação da velocidade instantânea do tapete, para que o momento da captura de imagem fosse mais preciso.



## 6. Conclusões

---

Neste capítulo final apresentam-se as conclusões bem como o trabalho futuro a desenvolver.

### 6.1. Conclusão

---

Neste projeto conseguiu-se implementar um sistema que calcule o ângulo de orientação de garrafas simétricas não redondas através de um sistema de visão. Um sistema deste género, em conjunto com um orientador mecânico, são uma mais-valia numa linha de transporte de garrafas tornando ainda mais eficiente o processo de paletização no que se refere a este tipo de garrafas.

Foram desenvolvidos os painéis de iluminação, bem como a estrutura para fixação dos painéis e das duas câmaras. Uma câmara foi posicionada no topo da estrutura, de modo a analisar o formato da garrafa, e a outra na lateral, de forma a analisar a posição de gravuras no corpo da garrafa. Foi desenvolvido o algoritmo que analisa e calcula a rotação necessária a aplicar a cada garrafa para que fiquem todas orientadas de igual forma.

A estrutura desenvolvida revelou-se adequada. Para um protótipo é necessário ter em atenção que em termos de *hardware* é vantajoso ter a possibilidade de regular a altura de montagem da câmara de topo para o caso de garrafas mais pequenas bem como de aproximar os painéis de iluminação para a boa identificação de gravuras na lateral das garrafas. O desenvolvimento dos painéis de iluminação revelou ser uma solução de baixo custo, mas que apresentou bons resultados.

Em termos de algoritmo as escolhas efetuadas produziram bons resultados, tanto na utilização do método do retângulo como no ICP como algoritmo de *matching*. A deteção de pixéis do relevo lateral da garrafa depende de uma boa afinação dos painéis e do ROI da imagem, que devem ser ajustados para cada nova garrafa em produção. No caso de garrafas do tipo B, com apenas um eixo de simetria, como é o caso da garrafa *D shape*, só é necessário utilizar a câmara de topo porque apenas existe um encaixe possível.

O tempo de execução do algoritmo pode ser otimizado, uma vez que alguns processos podem correr paralelamente. Isto foi demonstrado com a utilização de *threads*.

Foi realizado um conjunto alargado de testes para avaliar a performance do sistema, considerando 6° um valor de erro aceitável. Dos 72 ensaios realizados com a garrafa estática, para os três tipos de garrafa, 87,5% dos casos tiveram uma estimativa com um erro abaixo de 6° e, em apenas um ensaio, houve um erro superior a 8°. Dos 168 ensaios realizados para os três tipos de garrafa em movimento em 12 deles houve má identificação do lado correto da garrafa pela câmara lateral correspondendo a uma taxa de sucesso de 92,86%. Em termos de complexidade computacional, o algoritmo necessitou em média de 420,96 ms para analisar cada garrafa. Apesar de apenas ser possível realizar análise a 142 bpm (*bottles per minute*), este valor está próximo de 150 bpm, o valor de referência na indústria vidreira. Sendo este um sistema de prova de conceito, num sistema final podia ser equipado com melhor *hardware* para melhorar a sua performance.

## 6.2. Trabalho Futuro

---

Relativamente ao trabalho futuro existem alguns pontos que se podem melhorar. Existe margem para melhorar a robustez do algoritmo bem como ao nível de otimização do código, havendo a necessidade de este ser mais rápido. No caso de garrafas com mais do que dois eixos de simetria este algoritmo não está preparado para satisfazer essas necessidades. Nestes casos seria necessário correr o algoritmo de *matching* mais vezes de forma a testar mais hipóteses possíveis.

O sistema de aquisição podia ser melhorado utilizando uma câmara industrial como câmara de topo, de preferência da mesma família da já utilizada, e não uma *webcam*, tal como foi utilizada no desenvolvimento do projeto. Isto também traria facilidades quanto ao desenvolvimento do algoritmo, nomeadamente a possibilidade de ser utilizado outro sinal de *trigger*.

Ficou ainda por integrar um atuador mecânico, que num protótipo final completamente funcional seria necessário, de modo a aplicar a rotação calculada pelo algoritmo proposto à garrafa, bem como uma HMI para o utilizador poder parametrizar o equipamento.

# Bibliografia

---

- [1] H. Golnabi and A. Asadpour, “Design and application of industrial machine vision systems,” *Robot. Comput. Integr. Manuf.*, vol. 23, no. 6, pp. 630–637, 2007.
- [2] R. Davies, *Computer and Machine Vision, 4th Edition Theory, Algorithms, Practicalities Opsylum*, 4<sup>a</sup>. 2012.
- [3] D. S. J. D. Prince, *Computer Vision: Models, Learning, and Inference, 1st Edition*. Cambridge University, 2012.
- [4] marketsandmarkets.com, “Machine Vision Market by Component,” Global, 2017.
- [5] M. D. Selve, “EU CONTAINER GLASS PRODUCTION GROWTH SHOWS INDUSTRY RESILIENCE,” Brussels, 2015.
- [6] H. j. Liu and Y. n. Wang, “Development of a Computerized Method to Inspect Empty Glass Bottle,” *Comput. Sci. Comput. Technol. 2008. ISCST '08. Int. Symp.*, vol. 2, pp. 118–123, 2008.
- [7] K. Horák and I. Kalová, “Applied Methods for Transparent Materials Inspection,” 2006.
- [8] IRIS, “Evolution 12.” [Online]. Available: <http://www.iris-im.com/products/evolution12-sidewall/>. [Accessed: 15-Sep-2017].
- [9] Bucher Emhart Glass, “FleXinspect BC - Technical News Bulletin,” 2017. [Online]. Available: [http://www.bucheremhartglass.com/system/files/download\\_center/TNB186RevE\\_FleX\\_BC\\_Application\\_Notes.pdf](http://www.bucheremhartglass.com/system/files/download_center/TNB186RevE_FleX_BC_Application_Notes.pdf). [Accessed: 15-Sep-2017].
- [10] N. Instruments, “Guia prático sobre iluminação para visão de máquina,” 2017. [Online]. Available: <http://www.ni.com/white-paper/6901/pt/>. [Accessed: 01-Mar-2017].
- [11] J. M. A. Luz, “Sistema Automático de Inspeção,” ISEC, 2012.
- [12] Advanced Illumination, “Advanced illumination Ai LED Beleuchtungen - Catalog,” no. January. 2011.
- [13] D. Litwiller, “CMOS vs. CCD: Maturing Technologies, Maturing Markets,”

*Photonics Spectra*, vol. 39, no. 8, pp. 54–61, 2005.

- [14] Stemme Imaging, “Camera interfaces.” [Online]. Available: [/www.stemmer-imaging.co.uk/en/knowledge-base/camera-interfaces/](http://www.stemmer-imaging.co.uk/en/knowledge-base/camera-interfaces/). [Accessed: 09-Aug-2017].
- [15] Infaimon, “ENCICLOPÉDIA DE VISÃO,” 2014. [Online]. Available: <http://www.infaimon.com/pt/blogs/enciclopedia-cameras>. [Accessed: 09-Aug-2017].
- [16] Infaimon, “Software de imagem.” [Online]. Available: <http://www.infaimon.com/pt/software-de-imagem>. [Accessed: 30-Jul-2017].
- [17] N. Instruments, “10 Considerations When Choosing Vision Software,” *Set 16, 2016*, 2016. [Online]. Available: <http://www.ni.com/white-paper/2957/en/>. [Accessed: 01-Mar-2017].
- [18] A. Kelly, B. Nagy, D. Stager, and R. Unnikrishnan, “An Infrastructure-Free Automated Guided Vehicle Based on Computer Vision,” *Robot. Autom. Mag.*, vol. 14, no. 3, 2007.
- [19] E. N. Malamas, E. G. Petrakis, M. Zervakis, L. Petit, and J. Legat, “A survey on industrial vision systems, applications and tools,” *Image Vis. Comput.*, vol. 21, no. 2, pp. 171–188, Feb. 2003.
- [20] R. Stojanovic, “Real-Time Vision-Based System for Textile Fabric Inspection,” *Realt. Imaging*, vol. 7, no. 6, pp. 507–518, 2001.
- [21] M. Moganti, F. Ercal, C. H. Dagli, and S. Tsunekawa, “Automatic PCB Inspection Algorithms: A Survey,” *Comput. Vis. Image Underst.*, vol. 63, no. 2, pp. 287–313, Mar. 1996.
- [22] S. Mkwelo, “A machine vision-based approach to measuring the size distribution of rocks on a conveyor belt,” *An MSc Thesis Dep. Electr. Eng.*, no. May, 2004.
- [23] A. E. de S. Silva, “Collaborative human-machine quality control system: steps towards automatic machine vision inspection,” FEUP, 2014.
- [24] Paulo Milton Bastos Santos, “Detecção Automática de Propriedades em Peças Acabadas no Fabrico de Banheiras,” Universidade de Aveiro, 2008.
- [25] M. Sippel and M. Traxler, “Packagers Choose Machine Vision Quality Inspection to Reduce Waste and Boost ROI,” 2004.
- [26] O. Bandura, “Find Labeling Errors With Automated Visual Inspection,” 2017.

- [Online]. Available: <https://www.foodmanufacturing.com/article/2017/06/find-labeling-errors-automated-visual-inspection>. [Accessed: 20-Sep-2017].
- [27] T. Brosnan and D. W. Sun, "Improving quality inspection of food products by computer vision - A review," *J. Food Eng.*, vol. 36, no. 1 SPEC., pp. 3–16, 2004.
- [28] K. J. Pithadiya, C. K. Modi, and J. D. Chauhan, "Comparison of optimal edge detection algorithms for liquid level inspection in bottles," *2009 2nd Int. Conf. Emerg. Trends Eng. Technol. ICETET 2009*, no. January 2017, pp. 447–452, 2009.
- [29] Huanjun Liu and Yaonan Wang, "Development of glass bottle inspector based on machine vision," in *2008 10th International Conference on Control, Automation, Robotics and Vision*, 2008, no. December, pp. 785–790.
- [30] H. j. Liu and Y. n. Wang, "Development of a Computerized Method to Inspect Empty Glass Bottle," *Comput. Sci. Comput. Technol. 2008. ISCSCT '08. Int. Symp.*, vol. 2, pp. 118–123, 2008.
- [31] Y. Tai-shan, H. Xu-huai, L. Hong-min, and Z. Jia-wei, "Online detection of glass bottle crack based on evolutionary neural network and computer vision," in *2012 2nd International Conference on Consumer Electronics, Communications and Networks (CECNet)*, 2012, pp. 418–421.
- [32] Z. Yang and J. Bai, "Vial bottle mouth defect detection based on machine vision," in *2015 IEEE International Conference on Information and Automation*, 2015, pp. 2638–2642.
- [33] Glass Soft, "Orientador de garrafas | Glass Soft." [Online]. Available: <http://glass-soft.pt/portfolio-item/orientador-de-garrafas/>. [Accessed: 30-Jul-2017].
- [34] MSK Coverttech, "Bottle conveyor technology for the glass industry." [Online]. Available: <http://www.mskcoverttech.com/solutions/conveyor-systems/bottle-conveyor-glass/>. [Accessed: 30-Jul-2017].
- [35] E2M, "Orientación / FLEXITURN." [Online]. Available: <http://www.e2m.es/esp/productos/orientacion-clasificacion/productos.php?subproducto=orientadordebandas&subproductodevelop=orientadordebandas>. [Accessed: 30-Jul-2017].
- [36] E2M, "Flexiturn OBB 051 Manual.pdf." Barcelona, 2015.
- [37] ImagingDevelopmentSystems, "uEye Camera Manual," *Version 4.82.1*, 2017. .

- [38] Sony Computer Entertainment Europe, “Sony PS3 Eye - USB Camera,” 2007.
- [39] N. Otsu, “A Threshold Selection Method from Gray-Level Histograms,” *IEEE Trans. Syst. Man. Cybern.*, vol. 9, no. 1, pp. 62–66, Jan. 1979.
- [40] T. OpenCv, “The OpenCv Tutorial,” *CallforPapers.aspx*, 2017.
- [41] P. J. Besl and N. D. McKay, “A Method for Registration of 3-D Shapes,” *Spie*, vol. 1611, no. 2. pp. 586–606, 1992.
- [42] E. Ezra, M. Sharir, and A. Efrat, “On the performance of the ICP algorithm,” *Comput. Geom. Theory Appl.*, vol. 41, no. 1–2, pp. 77–93, 2008.
- [43] P. J. Yang, Tianhe; Besl, “Summary of ”A Method for Registration of 3-D Shapes”,” pp. 1–47, 2009.
- [44] D. W. Eggert, A. Lorusso, and R. B. Fisher, “Estimating 3-D rigid body transformations: a comparison of four major algorithms,” *Mach. Vis. Appl.*, vol. 9, no. 5–6, pp. 272–290, 1997.
- [45] B. Siciliano and O. Khatib, *Springer Handbook of Robotics*. Cham: Springer International Publishing, 2016.
- [46] IDS, “uEye Software Development Kit,” vol. 49, no. July, 2009.
- [47] cplusplus.com, “Thread.” [Online]. Available: <http://www.cplusplus.com/reference/thread/thread/>. [Accessed: 31-Jul-2017].
- [48] G. H. Levkine, “Prewitt, Sobel And Scharr Gradient 5X5 Convolution Matrices,” no. June, pp. 1–14, 2012.

# Anexos

## 1. Cálculo Painel Iluminação

Neste anexo estão presentes os cálculos necessários para o cálculo das dimensões mínimas do painel de iluminação tendo em conta os equipamentos utilizados no projeto. Os cálculos são acompanhados de imagens de modo a ajudar a perceber a sequência dos cálculos.

Dados dos Artigos:			
Diâmetro máximo da garrafa (mm):	200	Altura máxima da garrafa (mm):	400
Diâmetro médio da garrafa (mm):	80	Altura média da garrafa (mm):	280
Diâmetro mínimo da garrafa (mm):	50	Altura mínima da garrafa (mm):	70

Largura Transportador (mm):	115	Tipos de Sensores	Diâmetro	Largura	Altura
Dist. do painel ao Transportador (mm):	20	1/10"	1,6	1,28	0,96
Distância extra na largura (mm):	30	1/8"	2	1,6	1,2
Distância extra na altura (mm):	30	1/6"	3	2,4	1,8
		1/4"	4	3,2	2,4
		<b>1/3"</b>	<b>6</b>	<b>4,8</b>	<b>3,6</b>

$$\Phi = 2 \arctan (d / (2*f) )$$

$\Phi$  -> Angulo de visão da lente

d -> Diâmetros do sensor (Também pode ser largura ou comprimento)

f -> distância focal

$$\tan (\Phi) = \text{Cateto oposto} / \text{Cateto adjacente}$$

Distância da lente ao centro da garrafa (b)

$$b = c / \tan (\Phi / 2) \quad \text{onde } c = \text{Largura Garrafa} / 2 + \text{Dist. extra na largura}$$

Largura do Painel (L)

$$\tan (\Phi / 2) = (L / 2) / (b + (\text{Larg. Transp.} / 2) + \text{Dist. Painel ao Transp.})$$

Altura do Painel (H)

$$\tan (\Phi / 2) = (H / 2) / (b + (\text{Larg. Transp.} / 2) + \text{Dist. Painel ao Transp.})$$

Lentes (mm) para sensores 1/3"	$\Phi$ – Distância focal em largura	$\Phi$ – Distância focal em Altura	$\Phi$ – Distância focal em Diâmetro
2,8	81,12	65,28	93,56
3,5	68,52	54,25	81,12
<b>6</b>	<b>43,36</b>	<b>33,23</b>	<b>53,07</b>
8	33,23	25,21	41,06
12,5	21,44	16,23	26,59
16	17,03	12,5	21,14
25	10,58	8,14	13,41
50	5,29	4,07	6,52

\* Nos cálculos considero que o sensor terá a parte maior na vertical e a parte mais pequena na horizontal

\*\* O sensor CCD tem uma relação de 4/3 ou seja a Altura será 4/3 da Largura (ou ao contrario dependendo da posição do sensor)

Com o cálculo da distância da lente ao centro da garrafa considerando a <b>largura da garrafa</b>				
Considerando o sensor na Vertical				
Painel de Iluminação			Distância da lente ao Centro da garrafa (b) (Considerando a largura)	Altura da lente relativamente à base da garrafa (w / 2)
	Altura (H)	Largura (L)		
Valores médios	248	186	234,5859946	140
Valores Máximos	408	306	435,6597043	200
Considerando o sensor na horizontal				
Painel de Iluminação			Distância da lente ao Centro da garrafa (b) (Considerando a largura)	Altura da lente relativamente à base da garrafa (w / 2)
	Altura (H)	Largura (L)		
Valores médios	151	202	176,0811189	140
Valores Máximos	241	322	327,0077923	200

Com o cálculo da distância da lente ao centro da garrafa considerando a <b>altura da garrafa</b>				
Considerando o sensor na Vertical				
Painel de Iluminação			Distância da lente ao Centro da garrafa (b) (Considerando a altura)	Altura da lente relativamente à base da garrafa (w / 2)
	Altura (H)	Largura (L)		
Valores médios	<b>402</b>	<b>301</b>	<b>427,6255746</b>	<b>140</b>
Valores Máximos	<b>522</b>	<b>392</b>	<b>578,5522479</b>	<b>200</b>
Considerando o sensor na horizontal				
Painel de Iluminação			Distância da lente ao Centro da garrafa (b) (Considerando a altura)	Altura da lente relativamente à base da garrafa (w / 2)
	Altura (H)	Largura (L)		
Valores médios	386	515	569,7088441	140
Valores Máximos	506	674	770,7825538	200

## 2. Instalar e utilizar o OpenCV em Windows

---

Existem diversas opções de instalação e configuração o OpenCV em Windows, tendo-se optado pela hipótese de usar o ambiente MSYS2 para gerir a instalação do QtCreator com o MinGW (pode ser 32 ou 64 bit).

À data de 28/Julho/2016, as seguintes instruções resultam na instalação das seguintes *software*.

- MinGW (gcc 6.1 e gdb 7.11)
- Qt 5.6.1
- QtCreator 4.0.1
- OpenCV 3.1

### MSYS2:

O msys2 é um ambiente Shell de desenvolvimento muito semelhante à Shell Linux, que permite uma mais simples instalação e gestão de um conjunto de ferramentas de desenvolvimento como GCC, QT, etc.

A instalação base pode ser seguida a partir de:

<https://wiki.qt.io/MSYS2>

<https://sourceforge.net/p/msys2/wiki/MSYS2%20installation>

- Fazer *download* do instalador x86\_64 através do site <http://msys2.github.io/>, após o *download* deve-se executa-lo. Deve-se instalar o MSYS2 na *drive* C: na pasta "msys2";  
No final irá abrir um ambiente *Shell* do MSYS
- Atualize os componentes através do comando (este comando deve ser repetido o numero de vezes que for necessário, e a aplicação deve ser reinicializada ser for necessário);  
pacman -Syuu  
(selecione a opção substituir todos se essa opção aparecer)
- Agora deve instalar o *software* adicional necessário (selecione a opção substituir todos se essa opção aparecer);

```
pacman -S --needed base-devel git mercurial cvs wget p7zip
```

(pressione *enter* sem selecionar nenhum número)

- Devem ser instaladas as ferramentas adicionais (selecione a opção substituir todos se essa opção aparecer);

```
pacman -S --needed perl ruby python2 mingw-w64-x86_64-toolchain
```

(pressione *enter* sem selecionar nenhum número)

- Feche a *Shell*;
- Crie um atalho "C:\msys64\mingw64.exe" e utilize o atalho a partir de para utilizar o mingw64 para compilar e executar programas;
- Agora temos a opção de criar o Qt e o QtCreator a partir do zero ou usar binários pré-compilados existentes. Irá ser usado os ficheiros binários pré-compilados para acelerar o processo de instalação. A seguinte instalação usa cerca de 4Gb, portanto, pode demorar um pouco.

```
pacman -S mingw-w64-x86_64-qt-creator mingw-w64-x86_64-cmake  
mingw-w64-x86_64-extra-cmake-modules
```

### Configurar o QtCreator

- Através da shell MSYS2 é aberto o QtCreator através do comando (o & is sever para abrir o programa em *background*)

```
qtcreator&
```

- De seguida deve-se ir "Tools" -> "Options"
- Selecionar QBS e na opção KIT selecionar a opção "Desktop Qt MinGW-w64 64bit (MSYS2)";
- Agora deve ser selecionado o "build & Run" e o "Desktop Qt MinGW-w64 64bit (MSYS2)", na opção "CMake Generator", de seguida deve selecionar o "CodeBlocks - Unix Makefiles" e clicar em "OK";

### Carrega / Abrir o projeto no QtCreator

- Se não tiver já aberto deve abrir a *Shell* do MSYS2 e abrir o QtCreator através do comando (o & is sever para abrir o programa em *background*);

```
qtcreator&
```

- Clique em "Open Project", de seguida deve-se ir até ao ficheiro "CMakeLists.txt" do projeto.

- Escolha a opção "Desktop Qt MinGW-w64 64bit (MSYS2)" e clique em "Details"
- Deixe apenas a opção "Debug" ativa e altere a pasta para "<project older>\Debug", onde "<project folder>" é a pasta do projeto.
- Clique em "Configure Project"

O projeto será criado com a configuração estabelecida no ficheiro CMakeLists.txt. O projeto agora está pronto para ser executado ou ser depurado. Se desejar que o projeto seja executado numa janela nova, deve fazer o seguinte (com o projeto aberto):

- Clique em "Projects";
- Selecione o modo "Run" (em baixo);
- Ative a opção "Run in terminal";
- Execute o programa e confirme que ele é executado numa nova janela.

### **Instalar o OpenCV**

- Abrir a *shell* MSYS2;
- De seguida deve instalar os pre-built do OpenCV através do comando:

```
pacman -S --needed mingw-w64-x86_64-opencv
```

### **Executar a aplicação diretamente do Explorador do Windows**

- Para ser possível executar a aplicação diretamente através do Explorador do Windows, é necessário verificar se a DLL está disponível no "Windows Path";
- Para isso deve clicar o com botão dideito do rato no menu iniciar do Windows -> Sistema -> Definições avançadas do sistema -> Variáveis de ambiente (Environment Variables);
- Nas "Variaveis de sistema" (System variables), deve "Editar" o "caminho" da variável e ter a certeza que o caminho "C:\msys64\mingw64\bin;" foi incluído no início.



### 3. Instalar a Webcam PS3EYE

---

A utilização da *webcam* PS3 Eye da playstation em ambiente *Windows* não se resume a um sistema *plug and play*, é necessário proceder à instalação dos drivers necessários bem como incluir as bibliotecas necessárias à utilização desta webcam através das ferramentas de desenvolvimento.

Neste anexo são descritos os passos necessários para a utilização desta *webcam* inicialmente através do QtCreator e de seguida pelo Visual Studio.

#### **QtCreator:**

- Para instalar os drivers deve-se seguir os passos presentes em:

<https://github.com/cboulay/psmove-ue4/wiki/Windows-PSEye-Setup>

- Depois de instalados os drivers e de modo a aceder a *webcam* PS3 Eye através do QtCreator deve-se seguir os passos:

<https://github.com/inspirit/PS3EYEDriver/tree/master/src>

- Fazer *download* dos ficheiros e coloca-los na pasta do projeto:

ps3eye.cpp

ps3eye.h

- Através do MINGW64 deve-se instalar o pacote do libusb, de modo a ser possível aceder aos usb's através do Qtcreator:

```
pacman -S --needed mingw-w64-x86_64-libusb
```

- No projeto deve-se fazer include do header "ps3eye.h" e do "libusb.h" (este ultimo instalado através do minGW64):

```
#include <libusb-1.0/libusb.h>
```

```
#include "ps3eye.h"
```

- No CMakeLists adicionar no executável o "ps3eye.cpp", e nas target libraries o "usb-1.0", isto deve ser feito em todos os executáveis que necessitem de aceder à *webcam*, como no exemplo que se segue:

```
# Executable 1 - Projecto
add_executable(orientador_Projeto Projeto.cpp utils.cpp ps3eye.cpp)
target_link_libraries(orientador_Projeto
    ${OpenCV_LIBS} usb-1.0
    "C:\Program Files\IDS\uEye\Develop\Lib\uEye_api_64.lib")
```

Este procedimento seguiu como referencia:

<https://github.com/inspirit/PS3EYEDriver/blob/master/sdl/main.cpp>

### **Visual Studio:**

- Neste projeto foi descarregada a versão (1.0.21) disponível em:

<https://github.com/libusb/libusb/archive/v1.0.21.zip>

- Deve-se descomprimir o ficheiro para uma pasta própria;

- No Visual studio abrir a solução "libusb-1.0.21\msvc\libusb\_2015.sln" e compila-la em modo release x64;

- Após a compilação da solução "libusb", pode-se fechar essa solução/projeto;

- De seguida deve-se abrir e configurar o projeto através das propriedades do projeto e utilizar (como no exemplo que se segue):

- A pasta "libusb-1.0.21/libusb" para os includes;

- A pasta "libusb-1.0.21\x64\Release\lib" para as bibliotecas;

- O ficheiro libusb-1.0.lib para a biblioteca.

Orientador\_Online Property Pages

Configuration: Release Platform: Active(x64) Configuration Manager...

Configuration Properties

- General
- Debugging
- VC++ Directories
  - General
  - Optimization
  - Preprocessor
  - Code Generation
  - Language
  - Precompiled Headers
  - Output Files
  - Browse Information
  - Advanced
  - All Options
  - Command Line
- Linker
  - General
  - Input
  - Manifest File
  - Debugging
  - System
  - Optimization
  - Embedded IDL
  - Windows Metadata
  - Advanced
  - All Options
  - Command Line
- Manifest Tool
- XML Document Generator
- Browse Information
- Build Events
- Custom Build Step
- Code Analysis

**General**

Executable Directories: \$(VC\_ExecutablePath\_x64);\$(WindowsSDK\_ExecutablePath);\$(VS\_ExecutablePath);\$(MSBuild\_ExecutablePath);\$(FxCopDir);\$(PATH);

**Include Directories**: \$(VC\_IncludePath);\$(WindowsSDK\_IncludePath);\$(OPENCV\_DIR)\..\include;C:\Program Files\IDS\EyeDevelop\include;\$(SolutionDir)3rdparty\libusb-1.0.21\libusb;\$(SolutionDir)3rdparty\eye\include

Reference Directories: \$(VC\_ReferencesPath\_x64);

**Library Directories**: \$(VC\_LibraryPath\_x64);\$(WindowsSDK\_LibraryPath\_x64);\$(NETFXKitsDir)\Lib\um\x64;\$(OPENCV\_DIR)\Lib\C:\Program Files\IDS\EyeDevelop\Lib;\$(SolutionDir)3rdparty\libusb-1.0.21\x64\Release\lib;\$(SolutionDir)3rdparty\eye\lib

Library WinRT Directories: \$(WindowsSDK\_MetadataPath);

Source Directories: \$(VC\_SourcePath);

Exclude Directories: \$(VC\_IncludePath);\$(WindowsSDK\_IncludePath);\$(MSBuild\_ExecutablePath);\$(VC\_LibraryPath\_x64);

**Include Directories**

\$(VC\_IncludePath)  
 \$(WindowsSDK\_IncludePath)  
 \$(OPENCV\_DIR)\..\include  
 C:\Program Files\IDS\EyeDevelop\include  
 \$(SolutionDir)3rdparty\libusb-1.0.21\libusb  
 \$(SolutionDir)3rdparty\eye\include  
 \$(SolutionDir)\3rdparty\eye\include

Evaluated value:  
 C:\Program Files (x86)\Microsoft Visual Studio 14.0\VC\include  
 C:\Program Files (x86)\Microsoft Visual Studio 14.0\VC\atmf\include  
 C:\Program Files (x86)\Windows Kits\10\Include\10.0.10240.0\ucrt  
 C:\Program Files (x86)\Windows Kits\8.1\Include\um

Inherited values:  
 \$(VC\_IncludePath)  
 \$(WindowsSDK\_IncludePath)

Inherit from parent or project defaults

OK Cancel

**Include Directories**  
 Path to use when searching for include files while building a VC++ project. Corresponds to environment variable INCLUDE.

OK Cancel Aplicar



## 4. Instalar Visual Studio e OpenCV

---

Neste anexo são explicados os passos necessários para a instalação e utilização do Visual Studio.

Decidiu-se usar a versão 2015, dado que o ficheiro pré-compilado disponível do OpenCV é \*v14.exe, correspondendo à versão do Visual Studio 2015. Caso contrário seria necessário compilar o OpenCV, em vez de simplesmente descomprimir o ficheiro para uma pasta. Utilizando os *pre-built binaries* terá como desvantagem não ser possível configurar a compilação das bibliotecas, deste modo não será possível modificar o código fonte do OpenCV, se isto não for relevante para o projeto então deve-se utilizar os *pre-built binaries*.

Instalar o OpenCV de acordo com a informação disponível em:

[http://docs.opencv.org/3.2.0/d3/d52/tutorial\\_windows\\_install.html](http://docs.opencv.org/3.2.0/d3/d52/tutorial_windows_install.html)

(utilizando com os *pre-built binaries* será mais rápido e acessível, sem esquecer os passos disponíveis em "*Set the OpenCV environment variable and add it to the systems path*" no final da página).

De salientar que, neste caso, o ficheiro foi descompactado para a pasta "D:\Software\Windows\OpenCV", e a variável de ambiente OPENCV\_DIR ficou com o valor "D:\Software\Windows\OpenCV\opencv\build";

Apenas se deve abrir o Visual Studio depois de instalar o OpenCV e configurar a variável de ambiente.

```
setx OPENCV_DIR C:\OpenCV\opencv\build\x64\vc14
```

[http://docs.opencv.org/3.2.0/d3/d52/tutorial\\_windows\\_install.html](http://docs.opencv.org/3.2.0/d3/d52/tutorial_windows_install.html)

[http://docs.opencv.org/3.2.0/d6/d8a/tutorial\\_windows\\_visual\\_studio\\_Opencv.html](http://docs.opencv.org/3.2.0/d6/d8a/tutorial_windows_visual_studio_Opencv.html)