

PM

**Sistema de Medição de Distâncias  
para Aplicações Médicas  
com Base na Câmara NanEye Stereo**

PROJETO DE MESTRADO

**Bernardino José de Jesus Ascensão**

MESTRADO EM ENGENHARIA ELETROTÉCNICA-TELECOMUNICAÇÕES



UNIVERSIDADE da MADEIRA

*A Nossa Universidade*

[www.uma.pt](http://www.uma.pt)

fevereiro | 2018

**Sistema de Medição de Distâncias  
para Aplicações Médicas  
com Base na Câmara NanEye Stereo**

PROJETO DE MESTRADO

**Bernardino José de Jesus Ascensão**

MESTRADO EM ENGENHARIA ELETROTÉCNICA-TELECOMUNICAÇÕES

ORIENTAÇÃO

Fernando Manuel Rosmaninho Morgado Ferrão Dias

CO-ORIENTAÇÃO

Pedro Nuno Teixeira dos Santos



# CONSTITUIÇÃO DO JÚRI

## **PRESIDENTE**

Prof. Doutor Alberto de Jesus Nascimento,  
Professor Auxiliar da Universidade da Madeira

## **ARGUENTE**

Prof. Doutor Luís Armando de Aguiar Oliveira Gomes  
Professor Auxiliar da Universidade da Madeira

## **ORIENTADOR**

Prof. Doutor Fernando Manuel Rosmaninho Morgado Ferrão Dias,  
Professor Auxiliar da Universidade da Madeira

Funchal, 28 Junho de 2018



## Resumo

O presente projeto visou desenvolver um sistema que permita efetuar medições de distâncias em aplicações médicas, como por exemplo, a medição de pólipos e de outras alterações morfológicas, em contexto de endoscopia, para a determinação de diagnósticos médicos, utilizando o sistema NanEye Stereo criado pela empresa AMS Sensores Portugal. O algoritmo proposto por este trabalho poderá ser englobado no projeto do NanEye Stereo, como sendo parte integrante deste, adicionado à biblioteca de *software* utilizada pelo sensor. Os dois requisitos necessários a considerar são a eficácia, para determinar dimensões das estruturas, e o tempo de resposta, que deverá ser baixo, de forma a não afetar o desempenho do resto do sistema.

A forma como a aprendizagem das estruturas é feita neste projeto aproxima-se das redes neuronais, nomeadamente ao comportamento dos olhos, uma vez que através de duas perspetivas diferentes, o cérebro processa a informação dando a noção de profundidade.

O algoritmo criado permite calcular profundidades e dimensões de estruturas com base na correlação de pontos sobre os alvos nas imagens *stereo*, de forma simples e precisa. Tendo em conta as pequenas dimensões do sensor NanEye, o sistema criado permite operar a profundidades de 2 a 26 mm. No entanto foram encontradas dificuldades no que concerne à correlação do ponto sobre o alvo nas duas imagens *stereo*, por apresentarem ligeiras diferenças na imagem obtida por cada um dos sensores de imagem. De modo a ultrapassar este obstáculo, foi estudada e trabalhada a correlação das imagens, originando o desenvolvimento de complexos processos que visam a melhoria da qualidade nas duas imagens usadas para o processamento das distâncias.

Palavras chave:

Algoritmo; profundidade; distância; aplicações médicas; distorção de imagem; NanEye Stereo.



## Abstract

This project aimed to develop a system that allows the measurement of distances in medical applications, such as essential endoscopies for the determination of diagnoses, for example such as the measurement of polyps and other morphological changes, in the context of endoscopy, for the determination of medical diagnoses using the NanEye *Stereo* system created by the AMS Sensors Portugal, where this project took part.

The algorithm proposed by this work can be encompassed within the design of the NanEye *Stereo* project, as an integral part of the project, added to the software library used by the sensor. The two requirements are an effective method for determining *frame* dimensions and a low response time, so as not to affect the performance of the rest of the system.

The way in which learning of structures is done in this project is close to neural networks, in particular to eye behavior, once through two different perspectives it is possible to send the information to the brain and have the notion of depth.

The created algorithm allows us to calculate depths and dimensions of structures based on the correction of the points on targets in the *stereo* images, in a simple and precise way. Given the small dimensions of the NanEye sensor, the system created can operate at depths from 2 to 26 mm. However, difficulties related to the correlation of the points on the target were found in the two *stereo* images, because they present slight differences in the image obtained by each of the image sensors.. In order to overcome this obstacle, the correlation of images was studied and worked on, leading to the development of complex processes that aim at improving the quality of the two images used to process the distances.

Key words:

Algorithm; depth; distance; Medical applications; distortion of image; NanEye *Stereo*



## **Agradecimentos**

Gostaria de agradecer a todas as pessoas que direta ou indiretamente me acompanharam e incentivaram ao longo de todo o meu percurso.

Ao Professor Morgado Dias pelo desafio proposto, pela sua paciência, disponibilidade e apoio prestado ao longo da execução deste trabalho.

Ao meu coorientador, Engenheiro Pedro Santos, pela oportunidade de realizar este projeto, pelo tempo que despendeu na orientação, pela sua disponibilidade para o esclarecimento de dúvidas, por todo o conhecimento que me transmitiu, bem como o rigor imposto ao longo deste projeto.

A toda a equipa de profissionais da AMS Sensors Portugal, em especial ao Engenheiro Ricardo Sousa, pelos seus valiosos conselhos.

À Universidade da Madeira, em particular aos docentes da Faculdade de Ciências Exatas e da Engenharia, que permitiram elevar a minha formação no âmbito da Engenharia Eletrotécnica – Telecomunicações.

Aos meus pais, que sempre me apoiaram e estiveram presentes. Sem eles isto não seria possível.

À minha Noiva, Adriana Pinto de uma forma especial, pelo seu carinho, apoio e compreensão ao longo do meu percurso académico, bem como à sua família.

Aos meus irmãos, restante família e amigos pela amizade e apoio prestado ao longo da minha vida.



## Lista de Abreviaturas

Imagem *stereo* – Duas imagens do mesmo objeto obtidas em perspectivas diferentes

ADC – *Analogue to Digital Converter*

CCD – *Charge Coupled Device*

CMOS – *Complementary Metal Oxide Semiconductor*

DN – *Digital Number*

EFL – *Effective Focal Length*

FPS – *Frames Per Second*

LED – *Light Emitting Diode*

LVDS – *Low Voltage Differential Signaling*

USB – *Universal Serial Bus*

3D – Espaço Tridimensional



## Lista de símbolos

$D$  – Profundidade desde a câmara até ao alvo

$f$  – Distância do sensor ao ponto de foco

$l$  – Quantidade de *pixéis* no eixo das abcissas presente em cada sensor de imagem.

$L$  – Imagem *stereo* da esquerda (*Left*)

$P$  – Corresponde as coordenadas de um determinado ponto sobre o alvo

$P_L$  – Coordenadas do ponto sobre o alvo sobre a imagem da esquerda

$P_R$  – Coordenadas do ponto sobre o alvo sobre a imagem da direita

$R$  – Imagem *stereo* da direita (*Right*)

$X$  – Distância entre os centros dos dois sensores *stereos*

$X_L$  – Quantidade de *pixéis* sobre o eixo das abcissas, no sensor esquerdo desde o extremo esquerdo até a representação do ponto sobre o alvo

$X_R$  – Quantidade de *pixéis* sobre o eixo das abcissas, no sensor direito desde o extremo esquerdo até a representação do ponto sobre o alvo

$\alpha_1$  – Ângulo de interção do feixe de luz, no centro da câmara *stereo* esquerda proviniente do ponto sobre o alvo

$\alpha_2$  – Ângulo de interção do feixe de luz, no centro da câmara *stereo* direita proviniente do ponto sobre o alvo

$\theta$  – Metade do ângulo de abertura



# Índice

1.	Introdução .....	1
1.1	Motivação .....	1
1.2	Objetivos.....	2
1.3	Organização e conteúdos .....	2
2.	Estado de Arte .....	5
2.1	Captação da imagem.....	5
2.2	Sensores de imagem CMOS vs CCD.....	6
2.3	Implementação de um sistema digital de imagem .....	7
2.4	Lentes.....	10
2.5	Distorção.....	14
2.6	Cálculo da profundidade .....	16
2.6.1	Estereoscopia .....	16
2.6.2	Primeiro método de cálculo da profundidade .....	16
2.6.3	Segundo método de cálculo da profundidade .....	20
2.6.4	Terceiro método de cálculo da profundidade .....	25
2.6.5	Cálculo de dimensões de estruturas .....	26
2.7	Correlação dos pontos na imagem <i>stereo</i> .....	27
2.8	<i>Software</i> de desenvolvimento.....	29
2.9	Componentes utilizados.....	30
	NanEye <i>Stereo</i> .....	30
	EFM02 e placa NanoUSB3 .....	30
	Projektor de linha .....	31
	LED de luminosidade .....	32
3.	<i>Hardware</i> .....	33
4.	Implementação inicial.....	39
4.1	<i>User interface</i> inicial.....	39
4.2	Validação do ponto sobre o alvo na imagem <i>stereo</i> .....	40
4.2.1	Análise da sensibilidade de erro.....	42
4.2.2	Correção para profundidades negativas.....	44
4.3	Identificação do ponto selecionado sobre o alvo .....	45
4.4	Implementação do <i>touch</i> com o rato.....	46

4.5	Limitação da área de pesquisa dos pontos sobre o alvo .....	46
4.6	Calibração em distância.....	47
4.6.1	Calibração dos cálculos das profundidades pelos métodos um e três .....	48
4.6.2	Calibração do cálculo da profundidade pelo método dois .....	54
4.7	Escolha da equação do cálculo de profundidade .....	56
4.8	Comportamento do cálculo de profundidade .....	58
4.9	Conclusões .....	60
5.	Processamento de imagens digitais.....	63
5.1	Aplicação de <i>offset</i> na matriz RGB do sensor CMOS.....	63
5.2	Aumento do contraste .....	67
5.3	Cálculo da profundidade considerando a média temporal .....	72
5.3.1	Análise temporal para diversas distâncias .....	79
5.3.1	Análise de resultado em câmara escura .....	81
5.4	Correção da distorção da lente .....	83
5.5	Medição de estruturas .....	90
5.6	Mapa de cores com as profundidades .....	94
5.7	Conclusões .....	95
6.	Sistema final.....	97
7.	Conclusão e perspectivas de trabalho futuro .....	99
7.1	Conclusão geral.....	99
7.2	Trabalhos futuros .....	99
	Referências .....	101

## Índice de figuras

Figura 2.1 Estrutura do olho humano [5].	6
Figura 2.2 Arquitetura básica de um sistema digital <i>pipeline</i> na captura de imagens [8].	8
Figura 2.3 Filtro de cores de <i>Bayer</i> [8].	9
Figura 2.4 Resposta em frequência relativamente ao espectro de cor [4].	10
Figura 2.5 Vários tipos de lentes básicas [10] [12].	11
Figura 2.6 Refração da luz [10] [13].	11
Figura 2.7 Refração de feixes de luz sobre as lentes [10], [15].	12
Figura 2.8 Imagens das lentes convergente [10], [14].	13
Figura 2.9 Comportamento dos feixes de luz numa lente biconvexa [16].	14
Figura 2.10 a) Imagem sem distorção, b) Distorção em barril e c) distorção em almofada [10].	15
Figura 2.11 Esquema geométrico da distorção em barril e em almofada [10].	15
Figura 2.12 Determinação da distância $D$ através da triangulação [19].	17
Figura 2.13 Observação superior da visão <i>estereoscópica</i> , com ângulo de convergência e distância focal [19].	19
Figura 2.14 Geometria com o ponto entre as câmaras [16].	20
Figura 2.15 Geometria para um ponto à esquerda em ambas as câmaras [16].	22
Figura 2.16 Representação geométrica para determinar $\beta$ .	23
Figura 2.17 Geometria para o ponto exatamente em frente à câmara esquerda [16].	24
Figura 2.18 Objeto entre as câmaras: a)duas câmaras, b)câmara da esquerda, c) câmara da direita [20].	25
Figura 2.19 Geometria elementar para determinar $d$ .	26
Figura 2.20 Região de interesse: a) a cor vermelho a matriz de pesquisa e b) a cor verde a matriz a ser pesquisada [20].	28
Figura 2.21 Processo para encontrar a submatriz na imagem da direita [20].	28
Figura 2.22 Exemplo 1: Matizes não sincronizadas e Exemplo 2: Matizes sincronizadas [20].	29
Figura 2.23 Sensor <i>NanEye Stereo</i> [4].	30
Figura 2.24 FPGA com placa de desenvolvimento de interface de ligação do <i>NanEye Stereo</i> .	31
Figura 2.25 Philips Lumiledes Modelo LxZ1-PB01(Blue).	31
Figura 3.1 Primeiro cenário de testes.	33
Figura 3.2 Segundo cenário de testes.	34
Figura 3.3 Projetor de linhas sobre um alvo.	34
Figura 3.4 Imagens <i>stereo</i> com base no terceiro cenário.	35
Figura 3.5 Componentes junto à captura da imagem.	35
Figura 3.6 Vista de frente do sistema de captura da imagem.	36
Figura 3.7 Pistas de ligação do sensor <i>NanEye stereo</i> [4].	36
Figura 3.8 Terceiro cenário de teste.	37

Figura 4.1 <i>User interface</i> da plataforma inicial. ....	39
Figura 4.2 <i>User interface</i> utilizado no estudo da margem de erro da validação do ponto sobre o alvo. ....	42
Figura 4.3 Imagem da esquerda com os cinco pontos assinalados sobre o alvo. ....	43
Figura 4.4 Estudo da margem de erro. ....	43
Figura 4.5 Figura geométrica da representação do ponto P sobre o alvo nas imagens <i>stereo</i> . ....	44
Figura 4.6 Cenário de pesquisa do ponto sobre o alvo: a) pesquisa errada, b) pesquisa correta. ....	45
Figura 4.7 Demonstração da pesquisa do ponto sobre o alvo na imagem da direita. ....	45
Figura 4.8 Plataforma contendo os pontos assinalados sobre o alvo na imagem. ....	46
Figura 4.9 Limitação na pesquisa das imagens <i>stereo</i> . ....	47
Figura 4.10 Plataforma para a calibração dos cálculos de distância. ....	48
Figura 4.11 Calibração nos cálculos de profundidade de 10,62 mm. ....	49
Figura 4.12 Gráfico com a relação do cálculo de profundidade com o ganho de correção de profundidade. ....	50
Figura 4.13 Calibração do cálculo de profundidade de 0,52 mm. ....	51
Figura 4.14 Gráfico com a região linear na calibração da profundidade. ....	52
Figura 4.15 Gráfico com a reta para encontrar o ganho de correção do método cálculo das profundidades um e três. ....	52
Figura 4.16 Comparação das profundidades antes e após a calibração nos cálculos de profundidades pelos métodos de cálculo um e três. ....	53
Figura 4.17 Gráfico com a relação ganho de correção de profundidade com a profundidade. ....	54
Figura 4.18 Gráfico com a reta para encontrar o <i>ganho de correção da profundidade</i> dois. ....	55
Figura 4.19 Comparação das profundidades antes e após calibração no método de cálculo de profundidade dois. ....	56
Figura 4.20 Gráfico de comparação das três equações de cálculo de profundidade. ....	57
Figura 4.21 Relação <i>pixel</i> com a profundidade. ....	59
Figura 4.22 Relação <i>pixel</i> com a profundidade, limitando à profundidade entre 1 a 31mm. ....	60
Figura 5.1 Matriz de <i>Bayer</i> do sensor NanEye [10]. ....	63
Figura 5.2 Duas amostras de 5x5 <i>pixéis</i> . ....	64
Figura 5.3 Comparação da aplicação de <i>offset</i> . ....	65
Figura 5.4 Localização dos seis pontos sobre o alvo. ....	66
Figura 5.5 Gráfico com a comparação com e sem a aplicação do algoritmo de <i>offset</i> . ....	66
Figura 5.6 Gráficos com a comparação da aplicação do <i>offset</i> RGB. ....	67
Figura 5.7 Gráfico com a amostra da linha 125 após aplicação do algoritmo. .	69

Figura 5.8 Imagem com a comparação sem e com a aplicação do algoritmo de aumento de contraste.....	70
Figura 5.9 Comparação do cálculo de profundidade com e sem aplicação de algoritmos.....	71
Figura 5.10 Gráficos a comparar a aplicação dos algoritmos.....	71
Figura 5.11 Gráfico com o método de cálculo de profundidade de cinco pontos sobre o alvo com média de 100 imagens.....	73
Figura 5.12 Gráficos com a representação das três funções de cada linha. ....	75
Figura 5.13 Funções para determinar a região com maior contraste em DN na linha 111.....	75
Figura 5.14 Método de cálculo de profundidade com média acumulada até 30 cálculos de profundidade. ....	77
Figura 5.15 Gráfico com médias as acumuladas de três cálculos de profundidade por <i>frame</i> .....	78
Figura 5.16 Gráficos com os erros relativamente às médias acumuladas. ....	78
Figura 5.17 Alvo para o estudo da sequência de 100 <i>frames</i> em diversas profundidades.....	79
Figura 5.18 Gráfico com a comparação da profundidade medida com a profundidade estimada, através da média de 7 <i>frames</i> e 3 pontos sobre o alvo em cada <i>frame</i> . ....	80
Figura 5.19 Erro na estimava da profundidade calculada com a média de 7 <i>frames</i> e 3 pontos sobre o alvo por <i>frame</i> .....	80
Figura 5.20 Cálculo de profundidade através de média de 7 <i>frames</i> .....	81
Figura 5.21 Erro no cálculo de profundidade com média de 7 <i>frames</i> .....	81
Figura 5.22 Cálculo da profundidade em câmara escura.....	82
Figura 5.23 Erro no cálculo da profundidade em câmara escura.....	82
Figura 5.24 Erros nos cálculos da profundidade entre 2 a 22mm. ....	83
Figura 5.25 Alvo com fita métrica. ....	83
Figura 5.26 Localização dos pontos sobre o alvo P <sub>1</sub> , P <sub>2</sub> e P <sub>3</sub> . ....	84
Figura 5.27 Cenário com medições realizadas sobre o alvo. ....	84
Figura 5.28 Gráfico com os erros relativamente aos valores estimados para os três pontos sobre o alvo. ....	85
Figura 5.29 Comportamento de F(x) no intervalo de $-10 \leq x \leq 10$ .....	86
Figura 5.30 Comportamento de Runit.. ....	87
Figura 5.31 Comportamento do deslocamento dos <i>pixéis</i> . ....	87
Figura 5.32 Gráfico com erros após a calibração da distorção da lente.....	88
Figura 5.33 Comparação da mesma imagem: a) Com distorção e b) Sem distorção.....	89
Figura 5.34 Comparação de escalas: a) curtas profundidades e b) longas profundidades.....	90
Figura 5.35 Gráfico com a função da escala de 1mm na medição de estruturas. ....	91
Figura 5.36 Gráfico com as funções das retas de aproximação da função com a definição de escala de 1mm para a calcular distâncias. ....	91

Figura 5.37 Localização da estrutura medida de 3,5 mm sobre a imagem <i>stereo</i> da esquerda. ....	92
Figura 5.38 Medição de uma estrutura de 3,5 mm a diferentes profundidades. ....	93
Figura 5.39 Erro na medição de uma estrutura de 3,5mm a diferentes profundidades.....	93
Figura 5.40 <i>User interface</i> com o mapa de cores, com todas as profundidades. ....	95
Figura 6.1 <i>User interface</i> final do projeto.. ....	98

## Índice de Tabelas

Tabela 1 Comparação entre as tecnologias CMOS e CCD.....	7
Tabela 2 Valores médios por filtro de cor. ....	65
Tabela 3 Dados obtidos para a profundidade de 7,3 mm.....	76

## Índice de Fluxogramas

Fluxograma 4.1 <i>User interface</i> da plataforma inicial. ....	40
Fluxograma 4.2 Validação do ponto sobre o alvo na imagem <i>stereo</i> .....	41
Fluxograma 5.1 Algoritmo para encontrar as diferenças na sensibilidade de captura de cor RGB.....	64
Fluxograma 5.2 Aumento do contraste. ....	68
Fluxograma 5.3 Algoritmo para encontrar qual a região com maior nível de contraste em 3 linhas. ....	74
Fluxograma 5.4 Algoritmo de correção da distorção. ....	89
Fluxograma 5.5 Algoritmo que determina a distância entre os pontos sobre o alvo.....	92
Fluxograma 5.6 Mapa de cores com todas as profundidades.....	94



# 1. Introdução

Neste capítulo são apresentadas as motivações que deram origem à criação deste sistema de medição de profundidades e de estruturas, utilizando a câmara NanEye *stereo*.

## 1.1 Motivação

A evolução dos sistemas de processamento de imagem permitiu um crescimento na utilização das câmaras *stereo* mais avançadas e nas mais variadas aplicações. Este tipo de soluções encontra-se hoje em dia, na eletrónica de consumo, na área médica e na área industrial [1]. As aplicações com câmaras *estereoscópicas* para a medição de profundidades, são utilizadas nas mais variadas áreas como por exemplo na locomoção de veículos, no reconhecimento facial e de objetos e na imagiologia médica onde esta aplicação se insere [2].

O sensor NanEye *stereo* desenvolvido pela AMS Sensors Portugal<sup>1</sup>, foi desenvolvido para aplicações médicas, tendo em conta as suas características, apresentando dimensões compactas, com um tamanho de apenas 2,2x1 mm, composto por dois sensores de imagem de 1mm<sup>2</sup> de área e resolução 250x250 pixéis. Outras características são a robustez e a fiabilidade de operação, a qualidade de imagem e a alta frequência de captura e transmissão nominal de 44 imagens por segundo, com apenas 4 fios por câmara – dois para os dados e dois para alimentação [1].

Este sistema reúne as características ideais para ser utilizado dentro do corpo humano, nomeadamente em endoscopias médicas [1] para a medição de pólipos ou de outras alterações morfológicas, podendo o seu uso ser determinante para definir uma ação potencial futura em diagnósticos e, ser, ainda, usado em intervenções cirúrgicas, de modo a tornar este tipo de intervenções o menos invasivas possível.

Este trabalho pretendeu estudar e implementar uma solução de baixo recurso computacional utilizando o sistema da NanEye *Stereo* [4], que permitisse efetuar medições de distâncias e profundidades com precisão dos objetos e estruturas observadas.

---

<sup>1</sup> O *core business* da AMS Sensors Portugal centra-se em desenvolver e fornecer sensores de imagem para aplicações especializadas, com foco na endoscopia médica, inspeção industrial, tratamento de imagens de alta velocidade, sensores de linha de alta velocidade, câmaras de bordo em automóveis e de imagem e análise científica. A AMS Sensors Portugal oferece também sensores de imagem CMOS personalizados para estas aplicações, bem como produtos *standard* otimizados para áreas de aplicação bem definidas [1].

## 1.2 Objetivos

Os objetivos desta dissertação de mestrado foram os seguintes:

1. Investigação de métodos de cálculo de profundidades com base na utilização de câmaras *estereoscópicas*.
2. Estudo da correlação de um determinado ponto sobre o alvo incidente sobre as duas imagens *stereo*.
3. Criação do primeiro *user interface* em MATLAB® GUIDE, com a simulação de três formas distintas de calcular a profundidade com base nas investigações realizadas.
4. Escolha e calibração do melhor método de cálculo de profundidade.
5. Realização de diversos estudos de forma a melhorar a qualidade de imagem e conseqüentemente melhorar a correlação dos pontos selecionados sobre os alvos nas duas imagens, designadamente:
  - Estudo do cálculo da profundidade com base na média das várias *frames*.
  - Estudo da correção da sensibilidade na matriz Bayer com correção de *offset* nos sensores *red-green-blue*.
  - Estudo da melhoria no contraste de cor na escala de cinza.
  - Estudo da correção da distorção nas imagens provocada pela lente.
6. Medição de estruturas com base na profundidade de dois pontos sobre o mesmo alvo em diferentes posições.
7. Criação de um mapa de cores, com a representação da profundidade encontrada por *pixéis* em toda a imagem.
8. Reformulação do *user interface* de modo a que o sistema opere em modo *live* instantaneamente, incluído a medição da profundidade em modo automático, com a introdução de coordenadas e medição de estruturas de ponto a ponto sobre o alvo com a seleção *touch* do rato sobre a imagem da esquerda para a seleção dos dois pontos sobre o alvo.

## 1.3 Organização e conteúdos

O presente relatório está dividido em sete capítulos. No primeiro capítulo é feita uma introdução sobre o tema em estudo, dando a conhecer de uma forma geral o trabalho efetuado, a motivação e os objetivos que contribuirão para a realização deste projeto.

No segundo capítulo são apresentados os conceitos teóricos fundamentais para a compreensão do projeto, bem como o cálculo da profundidade, e a validação de uma determinada estrutura na imagem *stereo*.

No terceiro capítulo são apresentados os aspetos relacionados com o *hardware*, que englobam as diversas fases da assemblagem de todos os

componentes até ao sistema final, bem como as estruturas de suporte dos componentes durante as capturas de imagens.

No quarto capítulo é apresentada a forma como era efetuado o cálculo de profundidade, relativamente a um ponto sobre o alvo determinado nas duas imagens.

No quinto capítulo é descrita a forma como podia ser melhorado o sistema relativamente à validação do ponto sobre o alvo que incluía, *offset* nos filtros de cor *red-green-blue* do sensor de captura de imagem, aumento e melhoria do contraste, correção da distorção da lente, e ainda o cálculo da distância com base na média temporal para a validação da distância.

No sexto capítulo é apresentada a versão final do sistema, que opera em modo *live*, com a medição das estruturas a ser feita de forma instantânea.

Por fim, no sétimo capítulo são apresentadas as conclusões gerais do trabalho desenvolvido, bem como possíveis melhorias para a realização de trabalhos futuros.



## 2. Estado de Arte

Neste capítulo serão apresentados os conceitos teóricos estudados no âmbito do projeto, na criação de um sistema de medição de distâncias para aplicações médicas, com base no sensor NanEye *Stereo*.

Com base em pesquisas realizadas, verificou-se que atualmente existem empresas que estão a desenvolver sistemas de medição de profundidades com a utilização de câmaras *stereo*, com é o caso da ZED *Camera stereo* [2],[3] que reporta a utilização de *estereoscopia* para determinar a profundidade no meio tridimensional.

Com base em trabalhos académicos nesta área, foi possível encontrar soluções para o cálculo de profundidade, que utilizam a *estereoscopia*.

Neste capítulo será, também, efetuada uma abordagem ao modo de funcionamento das câmaras digitais.

### 2.1 Captação da imagem

O olho humano tem a capacidade de captar impulsos luminosos e transformá-los em impulsos elétricos, através de reações químicas [5]. O olho é composto por diversas estruturas, das quais se salienta a córnea, a íris, a pupila, o cristalino e a retina [5], representadas na Figura 2.1.

A córnea é composta por cinco camadas de tecidos transparentes que permitem a entrada de luz no olho. A luz ao atravessar a córnea, refrata-se, sendo esta parte do sistema de focagem do olho [5].

A íris corresponde à parte colorida do olho, sendo um músculo que rodeia uma abertura denominada de pupila, controlando a abertura da pupila é possível controlar a entrada de luz [5].

O cristalino, por sua vez é responsável por ajustar o foco de luz na retina, que contém fotorreceptores, que convertem a luz em impulsos elétricos, enviados para o cérebro de forma a serem interpretados como imagens [6].

Na retina existem dois tipos de recetores que são sensíveis a comprimentos de onda do espectro visível, nomeadamente: os cones – cerca de sete milhões – com capacidade de distinguir as cores, e os bastonetes – cerca de 120 milhões de fotorreceptores – sensíveis à intensidade luminosa [6].

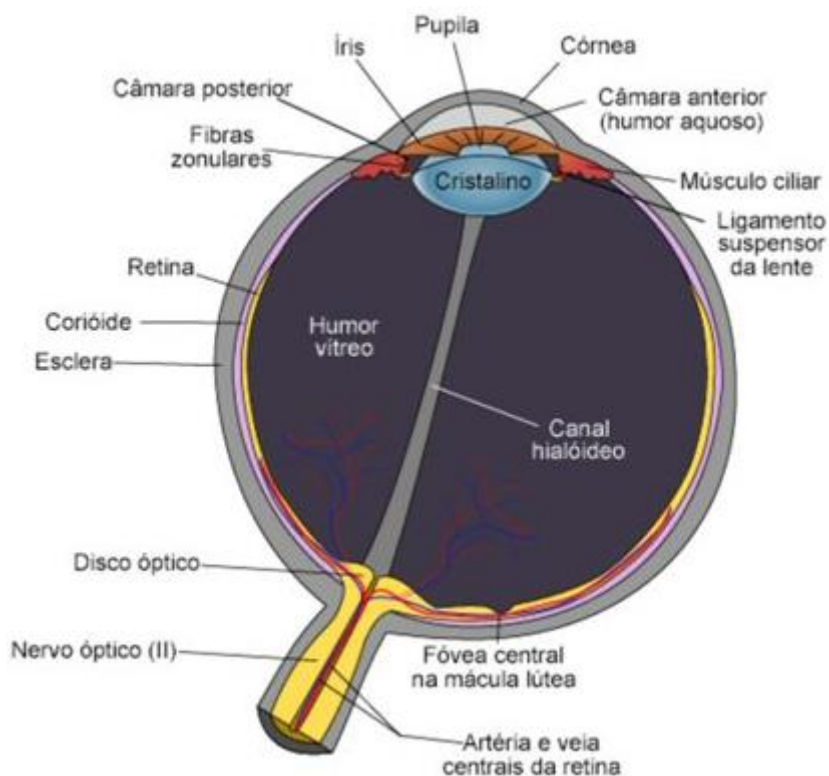


Figura 2.1 Estrutura do olho humano [5].

A tecnologia que está a ser criada para a medição de profundidades, pode ser comparada com a visão binocular humana, desde a captura das imagens *stereo*, através da captura de duas imagens e posteriormente a correlação dos mesmos pontos em ambas as imagens, de modo a ter noção da profundidade.

Neste âmbito, o algoritmo desenvolvido neste projeto permite efetuar medições de profundidade, pode ser utilizado dentro do corpo humano para curtas profundidades, tendo em conta as características do sensor NanEye *stereo* nomeadamente as suas pequenas dimensões. No entanto, esta tecnologia de medição de profundidades pode ser posteriormente adaptada a outro tipo de ambiente e câmaras *stereo*. Quanto ao tipo de aplicações, estas podem variar desde a orientação de veículos na indústria automóvel à observação de objetos em regiões pouco acessíveis, entre outras.

## 2.2 Sensores de imagem CMOS vs CCD

No que se refere à captura de imagens, é possível realizar uma analogia entre a captura de imagens feita pelo olho humano e as câmaras digitais [7]. Habitualmente, no mercado são utilizados dois tipos de sensores para a captura de imagens digitais, apesar de existirem outras tecnologias que são raramente utilizadas. Inicialmente, utilizou-se preferencialmente a tecnologia *Charge Coupled Device* (CCD) por ter melhor qualidade. Mais recentemente, com os grandes avanços da tecnologia e melhorias nos processos de fabricação, possibilitando menores custos e aumentos no processamento, os

*Complementary Metal Oxide Semiconductor* (CMOS) tecnologia na qual o sensor NanEye *stereo* foi produzido, têm dominado o mercado.

Quanto à utilização de uma ou outra tecnologia, existem vantagens e desvantagens associadas a ambas. Contudo, um dos fatores que as distingue é a forma com cada uma capta a luz. Na tecnologia CCD a captura de imagem é realizada por capacidade, com pouca eletrônica, e o sinal é disponibilizado à saída do sensor em formato analógico, para que o restante processamento seja realizado fora do sensor. Relativamente à tecnologia CMOS, esta incorpora mais eletrônica, de tal forma que a conversão para um sinal digital é realizada a nível do *pixel*, fazendo com que as áreas de captura de luz sejam menores, e tenham de operar a velocidades superiores, fazendo com que o ruído seja maior.

Segue-se a Tabela 1 que resume a comparação entre as tecnologias CMOS e CCD.

Tabela 1 Comparação entre as tecnologias CMOS e CCD.

	<b>CMOS</b>	<b>CCD</b>
Consumos de energia	menor	maior
Sensibilidade à luz	menor	maior
Área útil na captação de luz	menor	maior
Velocidade de processos de informação	maiores	maior
Custos de produção	menores	maior
Mais eletrônica	maior	maior
Ruído	maior	menor
Sinais a saída do sensor	digital	analógico

Existem diversos fatores que contribuíram para que os fabricantes apostassem mais na tecnologia CMOS. Entre eles destacam-se o menor consumo de energia, permitindo o uso de baterias de menores dimensões, a facilidade de produção, originando menores custos, podendo operar com frequências mais elevadas, o que equivale a sensores mais rápidos [8].

## **2.3 Implementação de um sistema digital de imagem**

O processo de captura de imagens digitais inicia-se com o foco da luz que incide sobre a lente da câmara proveniente da cena, situação representada [8] na Figura 2.2.

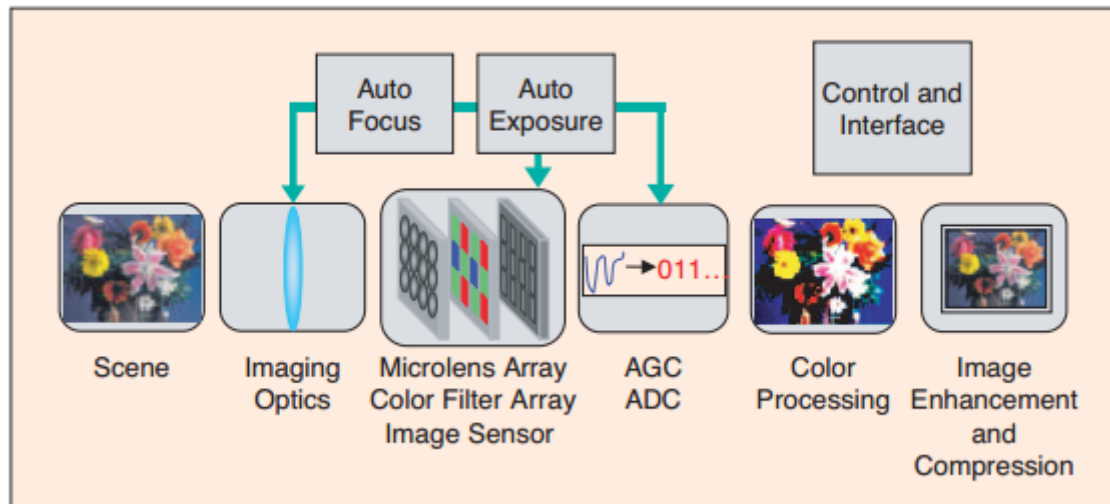


Figura 2.2 Arquitetura básica de um sistema digital *pipeline* na captura de imagens [8].

A imagem é capturada através de um sensor, constituído por uma matriz bidimensional de *pixéis* convertendo a luz incidente em sinais elétricos. O tamanho da matriz é o fator que determina a resolução da imagem num dado sensor, pelo que, quanto maior a quantidade de *pixéis*, maior será o detalhe da imagem e conseqüentemente melhor a qualidade da imagem antes do processamento. No entanto, comparando dois sensores de diferentes fabricantes, não é necessariamente verdade que o sensor com maior quantidade *pixéis* terá melhor qualidade, visto que existem outros fatores que influenciam a qualidade da imagem, tais como a arquitetura do fabricante e o ruído [8].

Entre a lente e a matriz do sensor existem duas camadas: a primeira corresponde a uma matriz de microlentes que permite concentrar os raios de luz sobre os *pixéis*, aumentando a sensibilidade do sensor; e a segunda camada, é uma matriz de filtros de cores de padrão de *Bayer*, que se encontra ampliada, estando representada na Figura 2.3. Esta matriz corresponde a um padrão de filtros de cores ordenado, em que cada *pixel* fica sensível a uma sub-gama de frequências da luz visível, centradas em torno dos comprimentos de onda referentes a verde, vermelho e azul, respectivamente [9].

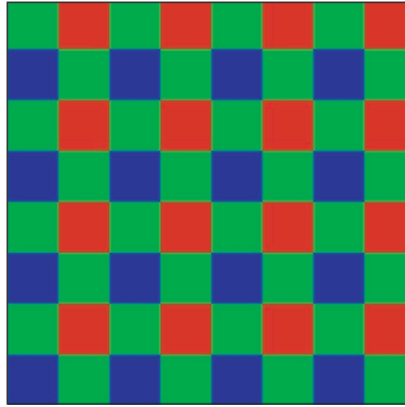


Figura 2.3 Filtro de cores de *Bayer* [8].

Quanto à ordem dos filtros de cores, estão ordenados com cores alternadas por linha, que variam entre o verde e o vermelho, e o azul e o verde, resultando em aproximadamente o dobro de filtros de cor verde justificado pela compreensão do sistema visual humano pelo facto dos nossos olhos percebem uma resolução de brilho superior comparativamente à cor. O padrão de cores de Bayer foi criado de forma a conseguir potenciar a receção dos feixes de luz, evitando as combinações dos filtros de cores adjacentes vermelha com azul sendo a configuração com menor permissão de passagem de raios de luz pelos filtros de cor, até chegar ao sensor resultando na configuração que potencializa melhor a captura de feixes de luz [9].

Na Figura 2.4 encontra-se representado o gráfico com a resposta relativa em frequência  $F_r$  função do comprimento de onda  $\lambda$  em nanometros, dada pela equação (2.1),

$$\lambda = \frac{1}{F_r} \quad (2.1)$$

Em que corresponde para cada um dos filtros de cor considerados na matriz de *Bayer*, de acordo com o manual do fabricante do NanEye [4].

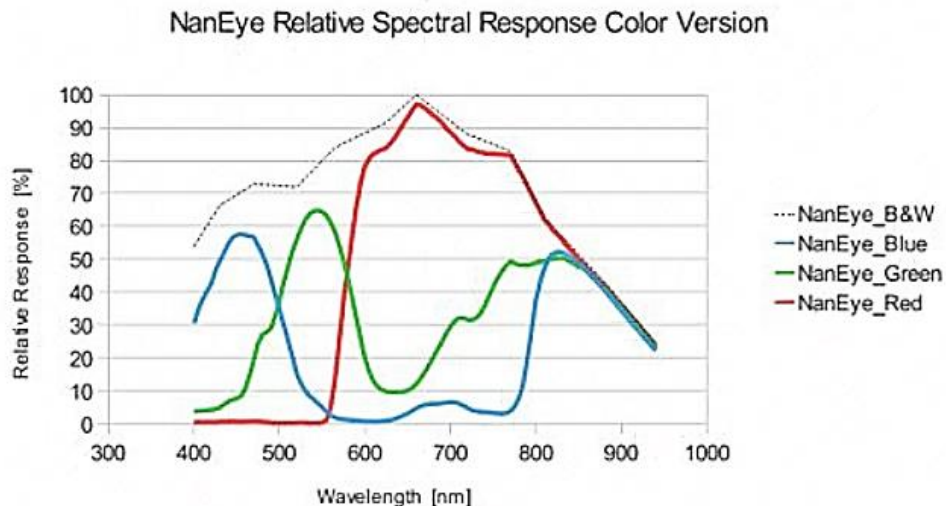


Figura 2.4 Resposta em frequência relativamente ao espectro de cor [4].

Os sensores captam os feixes de luz que são convertidos em sinais elétricos analógicos, sendo a amplitude do sinal dependente da intensidade luminosa.

Os sinais analógicos são posteriormente convertidos em sinais digitais, através de um conversor analógico-digital (ADC) em que a cada *pixel* corresponde a um valor. No caso da NanEye, a conversão é realizada numa escala de 10 bits ou seja 1024 níveis de deteção possíveis, sendo a unidade utilizada para o valor convertido o *Digital Number* (DN) [8].

As imagens a cores, com três componentes de cor por *pixel*, são produzidas a partir do pós-processamento da imagem capturada, usando um processo de interpolação espacial em cada *pixel*, contendo as tonalidades de cor vermelha, verde e azul. Este processo denomina-se de *demosaicing*. Seguidamente, é efectuado um ajuste na qualidade de imagem, sendo, finalmente, comprimida e armazenada em memória [8].

Posteriormente, podem ser efetuados diversos processamentos com vista à melhoria da qualidade da imagem, no entanto, esses processos podem tornar-se complexos devido à quantidade de processamento necessário. De referir que deve existir um compromisso entre a qualidade da imagem e o desempenho do sistema [8].

## 2.4 Lentes

As lentes são dispositivos óticos que atuam por refração, induzindo uma descontinuidade entre os meios em que a luz se propaga, diferenciando-se o efeito que provoca nos raios de luz em função da sua estrutura [10]. Existem, dois grupos de lentes: as que convergem os raios de luz, denominadas de convexas, com as extremidades finas em relação ao centro, e as que divergem os raios de luz, denominadas de divergentes ou concavas, em que as

extremidades são espessas em relação ao centro [10], de acordo com o que se encontra representado na Figura 2.5.

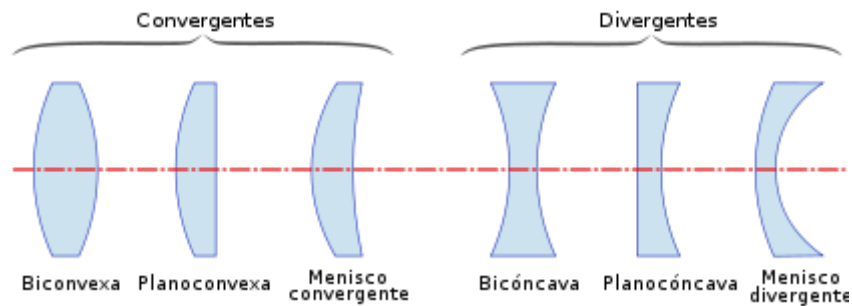


Figura 2.5 Vários tipos de lentes básicas [10] [12].

Para compreender o comportamento das lentes a serem utilizadas em sensores e câmaras fotográficas, é necessário conhecer alguns conceitos da ótica geométrica, pelo que serão de seguida apresentadas algumas leis da física, nomeadamente o princípio de Huygens [10], lei de Snell-Descartes [10], lei das reflexões e os princípios da Ótica Gaussiana [10].

O princípio de Huygens explica a propagação de uma onda, considerando que *“cada ponto de uma frente de onda primária constitui uma fonte para ondas esféricas secundárias, e a posição da frente de onda primária num instante posterior é determinada pela envolvente de todas estas ondas secundárias, que se propagam com velocidade e frequência igual à da onda primária”*, [10].

Por seu lado, Snell realizou alguns estudos tendo por base as leis da reflexão e refração, e efetuou deduções com base nos princípios de Huygens, relativamente ao efeito da deflexão e obteve a lei de Snell-Descartes, que defende que um feixe de luz ao incidir numa interface plana entre dois meios, com índices de refração diferentes ( $n_1$  e  $n_2$ ), com um ângulo  $\theta_1$ , parte do feixe de luz é refletido e a outra parte é transmitida, conforme se observa na Figura 2.6.

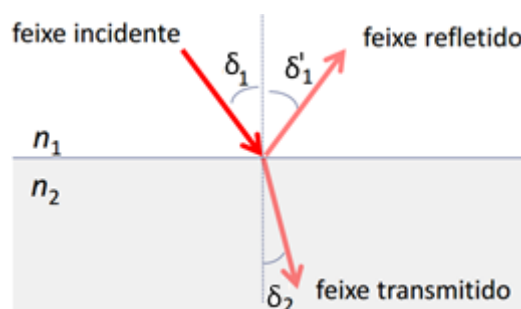


Figura 2.6 Refração da luz [10] [13].

A Lei de Snell estabelece a relação entre os ângulos:

$$n_1 \sin \delta_1 = n_2 \sin \delta_2 \quad (2.2)$$

se  $n_2$  for maior que  $n_1$  então  $\delta_2$  será menor do que  $\delta_1$  [10].

Em 1841, Gauss realizou uma análise sobre a formação da imagem, frequentemente denominada por ótica Gaussiana. De forma a compreender o comportamento dos feixes de luz escolheram-se dois tipos de lente, representadas a azul na Figura 2.7: lentes convexas nas alíneas a) e b), e lentes concavas nas alíneas c) e d). Analisando o comportamento dos raios, observa-se que nas lentes convexas os feixes de luz incidem na lente a) provenientes do infinito e convergem para um ponto único, denominado de foco  $F'$ . Por outro lado, se os feixes de luz partirem do foco  $F$  em direção à lente b) após atravessarem a lente, tornam-se paralelos ao eixo da lente. No caso das lentes côncavas e de acordo com c), os feixes de luz provenientes do infinito ao atravessarem a lente, dispersam-se seguindo uma trajetória com origem no ponto focal  $F$ , sendo este foco denominado de foco virtual. Em d) observa-se o oposto a c), em que os feixes de luz provenientes do infinito com trajetória convergente no ponto  $F'$ , após atravessarem a lente tornam-se paralelo ao eixo da lente. Do mesmo modo que apresentado anteriormente, o ponto de foco  $F'$  é um foco virtual [10] [14].

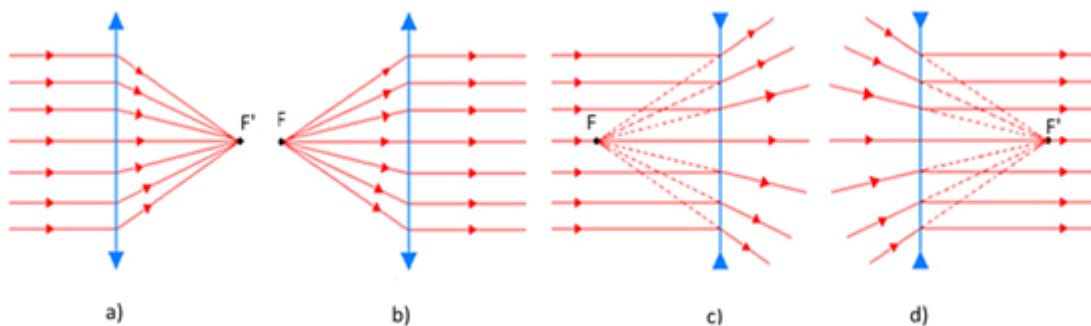


Figura 2.7 Refração de feixes de luz sobre as lentes [10], [15].

Com base no comportamento dos raios de luz anteriores, foi verificada a representação de um objeto, tendo em consideração as lentes convexas, também denominadas de lentes convergentes, e em consideração à profundidade entre um determinado objeto e a lente. De modo a facilitar a compreensão, serão tidas em conta as figuras geométricas representadas na Figura 2.8. A vermelho será representado o objeto, a verde a imagem sendo que  $s$  corresponde à distância entre o objeto e a lente,  $s'$  à distância entre a lente e a imagem, e  $F$  à distância focal [14].

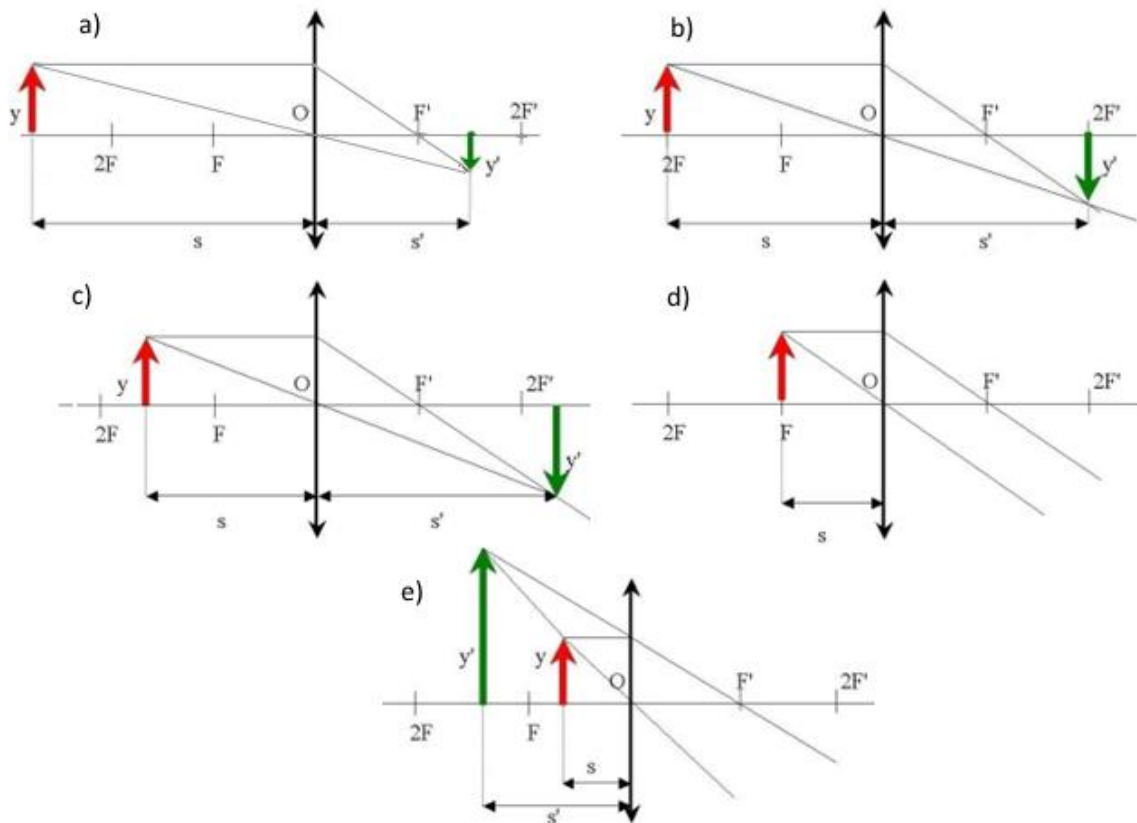


Figura 2.8 Imagens das lentes convergente [10], [14].

Na figura a) para profundidades superiores a duas vezes a distância focal, a representação da imagem é considerada real, invertida e menor que o objeto; na figura b) que o objeto se encontra à profundidade  $2F$ , a imagem é considerada real invertida e igual ao objeto; na figura c) o objeto encontra-se entre  $2F$  e  $F$  e a imagem é considerada real invertida e maior que o objeto; na figura d) o objeto encontra-se à profundidade  $F$  e neste caso não é formada uma imagem; e na figura e) o objeto encontra-se à uma profundidade entre  $F$  e a lente, e a imagem é considerada virtual direita e maior do que o objeto [10].

De forma a consolidar os conceitos anteriores, verificou-se o comportamento dos feixes de luz, considerando uma lente biconvexa, representada na Figura 2.9. No lado esquerdo da figura existem dois objetos  $h_o$  e  $h'_o$ , na mesma posição, mas com diferentes alturas. De cada um dos objetos são considerados dois feixes de luz, sendo que um viaja paralelo ao eixo da lente e o outro passa pelo foco em direção à lente. Considerando os dois tipos de feixes provenientes de cada objeto, após os feixes transporem a lente, os mesmos interseccionam-se formando uma imagem para cada objeto. Essas imagens são consideradas reais, invertidas e inferiores em relação aos objetos de origem, sendo as imagens denominadas de  $h_l$  e  $h'_l$  [10], [14].

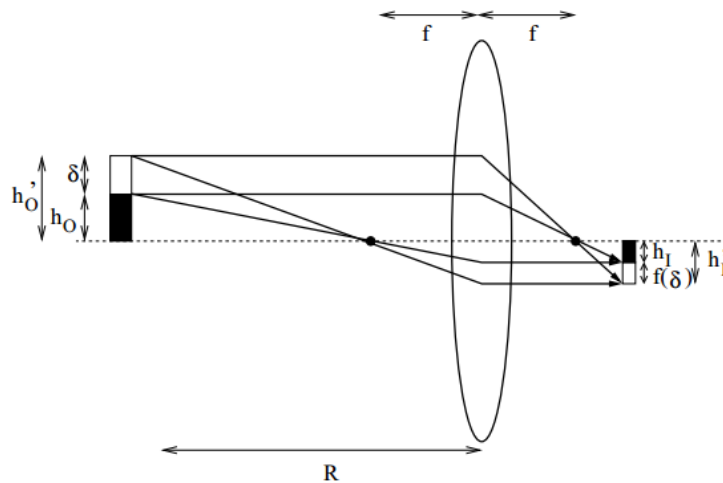


Figura 2.9 Comportamento dos feixes de luz numa lente biconvexa [16].

Este sistema é composto por apenas uma lente, tendo sido utilizado nas primeiras câmaras fotográficas. Atualmente, utilizam-se conjuntos de lentes cujo objetivo é o mesmo, tendo como vantagem a variação do foco e consequentemente o aumento e diminuição do *zoom* dos objetos capturados pelos sensores de imagem [10].

A lente utilizada pelo sensor NanEye é equivalente a uma lente biconvexa, com um campo de abertura *Field of View* (FOV)  $90^\circ$  e uma taxa de transferência geral de luz *Focal number* (F# 2.7) [4].

## 2.5 Distorção

As lentes podem provocar diversos desvios à ótica Gaussiana relativamente às condições ideais, denominadas de aberrações cromáticas e monocromáticas.

Atendendo a tal, será abordado a aberração monocromática da distorção, que se encontra presente no sensor NanEye, e se manifesta através de uma deformação na imagem, decorrente do facto de regiões distintas das lentes apresentarem diversas distâncias focais e consequentemente amplificações distintas [10].

A distorção, pode ser negativa chamada distorção em barril, conforme a Figura 2.10, ou positiva denominada de distorção em almofada, representada na Figura 2.10 c). A distorção em barril caracteriza-se pelo facto da representação de cada *pixel* na imagem convergir para o centro desta com o aumento do raio relativamente ao centro, enquanto na distorção em almofada, o aumento do raio provoca a dispersão da representação de cada *pixel* na imagem relativamente ao centro da imagem.

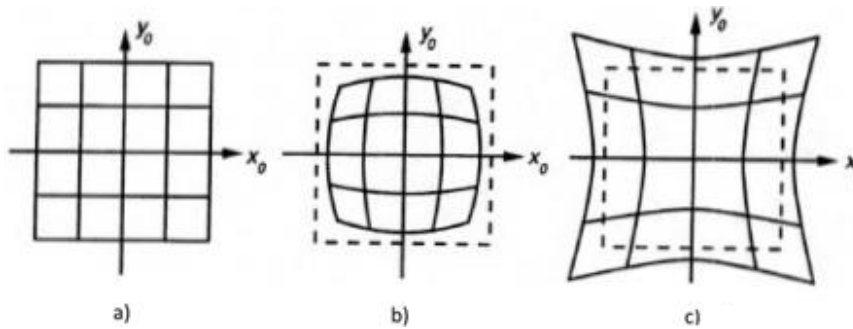


Figura 2.10 a) Imagem sem distorção, b) Distorção em barril e c) distorção em almofada [10].

No olho humano a íris corresponde ao orifício que controla a entrada dos feixes de luz. No caso das câmaras é chamado de diafragma. Este provoca uma distorção na imagem, no entanto, é importante porque tem duas funções, nomeadamente controlar a entrada de luz para o sensor e controlar a profundidade de campo, sendo que quanto maior a sua abertura menor será a profundidade de campo [10].

Na Figura 2.11 encontram-se representadas as figuras geométricas que ajudam a compreender como surgem as aberrações relativamente à distorção,

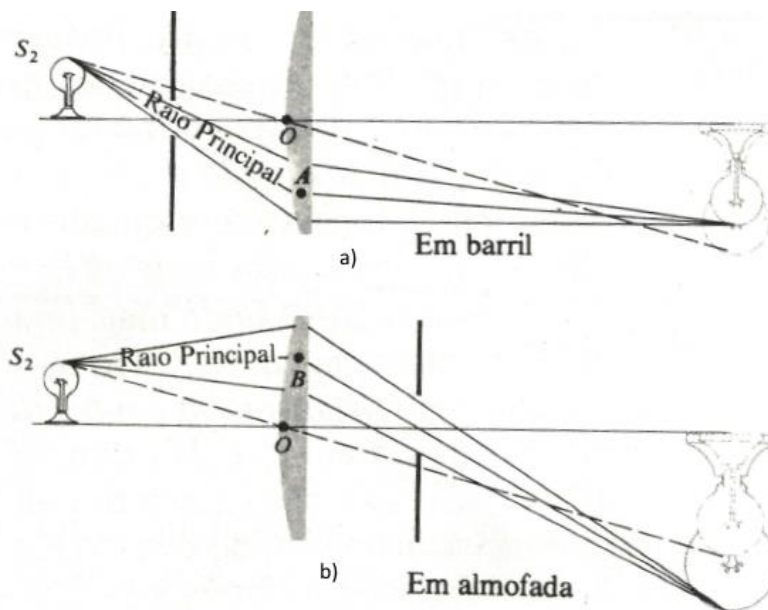


Figura 2.11 Esquema geométrico da distorção em barril e em almofada [10].

Na Figura a) o diafragma encontra-se à frente da lente, e por isso os raios de luz que chegam ao centro da lente serão em menor quantidade relativamente à ausência do diafragma, o que provoca uma distorção negativa, na Figura b) o diafragma encontra-se atrás da lente, existindo uma diminuição nos feixes de luz provenientes do centro da lente, comparativamente à inexistência de diafragma, provocando uma distorção positiva na imagem [10].

## 2.6 Cálculo da profundidade

Para determinar distâncias em profundidade existem alguns sistemas que a partir do tempo de resposta do envio e recepção de sinais estimam a profundidade, usando infravermelhos, sistemas de radar ou sistemas de ultrassom [17]. Outros tipos de sistemas utilizam câmaras situadas uma ao lado da outra, como é o caso da câmara utilizada neste projeto, a NanEye *stereo*, que através de algoritmos calculam profundidades e dimensões de objetos com base nas imagens *stereo*.

Serão apresentados três métodos de cálculo da profundidade que utilizam *estereoscopia*. Posteriormente será escolhido o método mais eficiente em termos de exatidão e precisão de cálculo e simplicidade de expressão. No que se refere à exatidão e precisão devem existir de modo a coincidirem com os valores medidos. Quanto à simplicidade nos cálculos é importante, pois não poderá comprometer o funcionamento do sistema existente ao requerer demasiados recursos de processamento. Estes requisitos são essenciais, dado que este projeto pode posteriormente ser associado ao projeto principal da NanEye *stereo* do fabricante.

### 2.6.1 Estereoscopia

A *estereoscopia* ou visão binocular é a técnica que permite efetuar uma correlação, entre duas ou mais imagens digitais em perspectivas diferentes, obtendo informações do espaço Tridimensional (3D). De uma forma geral, a *estereoscopia* é utilizada no sistema visual humano e de muitos animais, sendo que cada olho capta uma imagem com perspectivas diferentes e posteriormente são processadas através do cérebro, permitindo ter a noção do espaço tridimensional e da profundidade do espaço [18], [19],.

### 2.6.2 Primeiro método de cálculo da profundidade

A primeira técnica de cálculo da profundidade é obtida a partir de alguns princípios básicos de triangulação [22].

Quanto à descrição das referências utilizadas nas figuras geométricas, serão mantidas as mesmas em todos os métodos de cálculo.

No primeiro método de cálculo da profundidade será considerada a Figura 2.12, sendo as referências as seguintes: P corresponde a um determinado ponto sobre o alvo numa posição estática, que se encontra a uma profundidade D relativamente à reta X que forma um angulo reto entre D e X. De referir que a reta X corresponde à distância entre os centros das duas câmaras, L é centro da câmara da esquerda, R ao centro da câmara da direita,  $H_L$  é a distância de L a P,  $H_R$  é a distância de R a P,  $x'$  a distância sobre a reta X desde L até a

intercessão com  $D$ , tal com  $x''$  de  $R$  a  $D$ , quanto aos ângulos:  $\alpha_1$  é o ângulo entre  $H_L$  e  $X$ ;  $\beta_1$  ângulo entre  $H_L$  e  $D$ ;  $\beta_2$  ângulo entre  $D$  e  $H_R$ ;  $\alpha_2$  ângulo entre  $X$  e  $H_R$  [22].

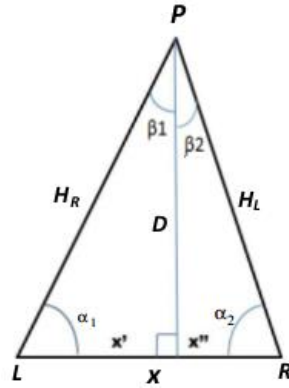


Figura 2.12 Determinação da distância  $D$  através da triangulação [22].

De forma a determinar  $D$  consideram-se as equações (2.3) e (2.4), utilizando a lei dos senos:

$$H_L = \frac{D}{\sin \alpha_1} = \frac{x'}{\sin \beta_1} \Leftrightarrow x' = \frac{D \cdot \sin \beta_1}{\sin \alpha_1} \quad (2.3)$$

E;

$$H_R = \frac{D}{\sin \alpha_2} = \frac{x''}{\sin \beta_2} \Leftrightarrow x'' = \frac{D \cdot \sin \beta_2}{\sin \alpha_2} \quad (2.4)$$

Sendo que;

$$X = x' + x'' = \frac{D \cdot \sin \beta_1}{\sin \alpha_1} + \frac{D \cdot \sin \beta_2}{\sin \alpha_2} \quad (2.5)$$

Considerando a soma de todos os ângulos internos do triângulo;

$$\alpha_1 + \beta_1 + 90^\circ = 180^\circ \Leftrightarrow \beta_1 = 90^\circ - \alpha_1 \quad (2.6)$$

E;

$$\alpha_2 + \beta_2 + 90^\circ = 180^\circ \Leftrightarrow \beta_2 = 90^\circ - \alpha_2 \quad (2.7)$$

Obtém-se a equação (2.8) substituindo na equação (2.5) as equações (2.6) e (2.7),

$$X = \frac{D \cdot \sin(90^\circ - \alpha_1)}{\sin \alpha_1} + \frac{D \cdot \sin(90^\circ - \alpha_2)}{\sin \alpha_2} \quad (2.8)$$

Considerando a relação seno-cosseno;

$$\sin(90^\circ - \omega) = \cos \omega \quad (2.9)$$

Obtém-se a equação (2.10);

$$X = \frac{D \cdot \cos \alpha_1}{\sin \alpha_1} + \frac{D \cdot \cos \alpha_2}{\sin \alpha_2} \quad (2.10)$$

Podendo ainda ser utilizada a equação trigonométrica;

$$\frac{\cos \omega}{\sin \omega} = \frac{1}{\tan \omega} \quad (2.11)$$

Resultando em;

$$X = \frac{D}{\tan \alpha_1} + \frac{D}{\tan \alpha_2} \quad (2.12)$$

Resolvendo em ordem a  $D$ ;

$$D = \frac{X}{1/\tan \alpha_1 + 1/\tan \alpha_2} \quad (2.13)$$

Através da equação (2.13) é possível determinar a distância  $D$  definida como profundidade, sabendo apenas a distância entre o centro das câmaras e os ângulos dos feixes de luz incidentes sobre os sensores de imagem relativamente ao ponto sobre o alvo no qual é pretendido medir a profundidade. Porém, os ângulos dos feixes de luz incidentes nas imagens digitais não podem ser obtidos de uma forma direta, sendo necessário encontrar outras formas de os determinar.

A representação geométrica na Figura 2.13 vem auxiliar a obter os ângulos  $\alpha_1$  e  $\alpha_2$  no entanto, antes é necessário verificar que a reta  $r$  é paralela à reta  $s$ , com a distância  $f$ , que corresponde à distância focal entre o ponto de foco de cada imagem situada sobre a reta  $r$  e os sensores de captura da imagem sobre a reta  $s$ . e corresponde a metade do ângulo de abertura de cada sensor.

Os ângulos  $\alpha'_1$  e  $\alpha_1$  são iguais, pelo que é abreviada em  $\alpha_1$ , tal como  $\alpha'_2$  e  $\alpha_2$ , será abreviado em  $\alpha_2$ .

No que diz respeito às referências  $(a)$  com  $(a')$  e  $(b')$  com  $(b)$  estas correspondem a metade da quantidade de *pixéis* no eixo das abcissas de cada sensor, neste caso 125 *pixéis*. Em que  $(a)$  corresponde ao número de *pixéis* desde o centro da imagem esquerda até à representação do ponto sobre o alvo e  $(a')$  desde a representação do ponto sobre o alvo até ao extremo direito. De igual forma na segunda imagem  $(b')$  corresponde à quantidade de *pixéis* desde o extremo esquerdo até a representação do ponto sobre o alvo e  $(b)$  desde a representação do ponto sobre o alvo até ao centro do sensor [22].

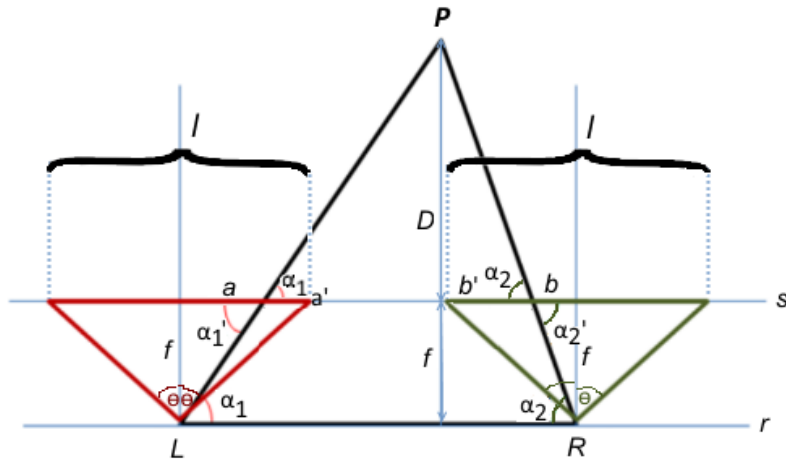


Figura 2.13 Observação superior da visão estereoscópica, com ângulo de convergência e distância focal [22].

O valor de  $f$  é determinado a partir da figura geométrica, através de metade do ângulo de abertura  $\theta$  fornecido pelas especificações da câmara (FOV) e  $l$  o número máximo de *pixéis* no eixo das abcissas:

$$f = \frac{l/2}{\tan \theta} \quad (2.14)$$

O valor de  $\alpha_1$  pode ser obtido;

$$\tan \alpha_1 = \frac{f}{a} \quad (2.15)$$

E  $\alpha_2$ ;

$$\tan \alpha_2 = \frac{f}{b} \quad (2.16)$$

Tendo por base a equação (2.13), substituem-se as equações (2.15) e (2.16) resultando em:

$$D = \frac{X}{\frac{1}{f} + \frac{1}{f}} = \frac{X}{\frac{a}{f} + \frac{b}{f}} = \frac{X}{\frac{1}{f}(a+b)} \Leftrightarrow D = \frac{f \cdot X}{a+b} \quad (2.17)$$

Com os valores de  $a$  e  $b$  obtidos através das imagens digitais é possível determinar a profundidade  $D$ , de acordo com a equação (2.17). É possível simplificar a equação considerando  $l$  o número máximo de *pixéis* no eixo das abcissas relativamente a cada sensor de imagem, que neste caso corresponde a 250 *pixéis*, a simplificação resulta em:

$$D = \frac{f \cdot X}{\left(\frac{l}{2} - a'\right) + \left(\frac{l}{2} - b'\right)} = \frac{f \cdot X}{l - a' + b'} \quad (2.18)$$

Se for considerada a quantidade de *pixéis* desde a origem, considerando desde o extremo esquerdo em cada imagem até ao ponto sobre o alvo, resulta em  $x_L=l-a'$  e na imagem direita  $x_R=b'$ , resultando na equação (2.19):

$$D = \frac{f \cdot X}{X_L - X_R} \quad (2.19)$$

Esta é a primeira forma de cálculo da profundidade entre os sensores e o ponto sobre o alvo [22].

### 2.6.3 Segundo método de cálculo da profundidade

O segundo algoritmo apresenta três formas distintas de calcular a distância, que depende da posição do ponto sobre o alvo representado nas imagens *stereo*, sendo a primeira quando o ponto se encontra entre as duas câmaras, a segunda quando se encontra na metade direita ou na metade esquerda em ambas as imagens e por fim quando se encontra exatamente no centro de uma das imagens *stereo*. As equações para cada situação dependem da figura geométrica [22].

#### 2.6.3.1 Cálculo da profundidade com o ponto entre as duas câmaras

Quando o ponto sobre o alvo se encontra entre as câmaras significa que se localiza na metade direita da imagem *stereo* da esquerda, e na metade esquerda da imagem *stereo* da direita, conforme representado na Figura 2.14.  $\theta_1$  e  $\theta_2$  correspondem a metade do ângulo de abertura, e foram simplificados passando a denominar-se  $\theta$ .

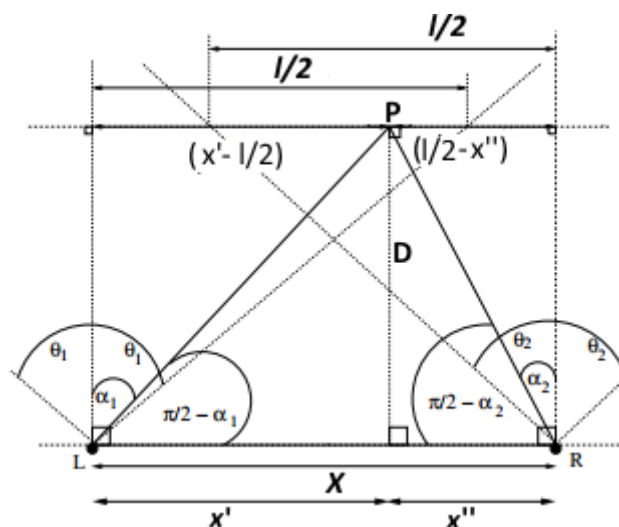


Figura 2.14 Geometria com o ponto entre as câmaras [16].

Obtendo-se as relações geométricas para a câmara esquerda verifica-se:

$$\tan \theta_1 = \frac{l}{\frac{D}{2}} \quad (2.20)$$

E;

$$\tan \alpha_1 = \frac{\left(x' - \frac{l}{2}\right)}{D} \quad (2.21)$$

A equação (2.22) resulta da substituição de  $D$  na equação (2.21), pela equação (2.20):

$$\alpha_1 = \tan^{-1} \left( \frac{\left(x' - \frac{l}{2}\right)}{\frac{l}{2}} \cdot \tan \theta_1 \right) \quad (2.22)$$

De uma forma idêntica determina-se  $\alpha_2$  sendo:

$$\alpha_2 = \tan^{-1} \left( \frac{\left(\frac{l}{2} - x''\right)}{\frac{l}{2}} \cdot \tan \theta_2 \right) \quad (2.23)$$

Com base na Figura 2.14 também é possível determinar a relação;

$$\tan \left( \frac{\pi}{2} - \alpha_1 \right) = \frac{D}{x'} \quad (2.24)$$

Resolvendo em ordem a  $D$  obtém-se a equação (2.25);

$$D = \tan \left( \frac{\pi}{2} - \alpha_1 \right) \cdot x' \quad (2.25)$$

E na câmara da direita pode ser obtido;

$$\tan \left( \frac{\pi}{2} - \alpha_2 \right) = \frac{D}{X - x'} \quad (2.26)$$

Substituindo  $D$  na equação (2.26) pela equação (2.25) resulta em;

$$\tan \left( \frac{\pi}{2} - \alpha_2 \right) = \frac{\tan \left( \frac{\pi}{2} - \alpha_1 \right) \cdot x'}{X - x'} \quad (2.27)$$

Desenvolvendo em ordem a  $x'$  resulta;

$$x' = \frac{\tan \left( \frac{\pi}{2} - \alpha_2 \right) \times (X - x')}{\tan \left( \frac{\pi}{2} - \alpha_1 \right)} \quad (2.28)$$

Voltando à equação (2.25), substitui-se  $x'$  pela equação anterior, resultando em;

$$D = \frac{\tan\left(\frac{\pi}{2} - \alpha_1\right) \cdot \tan\left(\frac{\pi}{2} - \alpha_2\right) \cdot X}{\tan\left(\frac{\pi}{2} - \alpha_1\right) + \tan\left(\frac{\pi}{2} - \alpha_2\right)} \quad (2.29)$$

Com a equação (2.29), é possível determinar a  $D$ , sabendo a distância entre as câmara e os ângulos  $\alpha_1$  e  $\alpha_2$  determinados previamente, através das equações (2.22) e (2.23) [16].

### 2.6.3.2 Cálculo da profundidade com o ponto em ambas as câmaras na metade direita ou esquerda

Na segunda figura geométrica o ponto sobre o alvo encontra-se na metade direita ou na metade esquerda em ambas as câmaras. Com base na Figura 2.15 será efetuada uma análise geométrica, de forma a calcular a distância das câmaras ao ponto sobre o alvo.

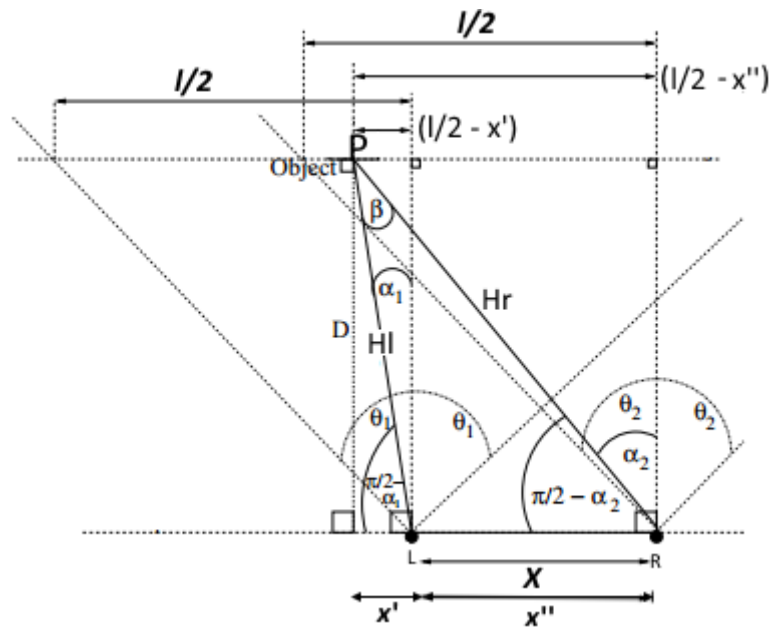


Figura 2.15 Geometria para um ponto à esquerda em ambas as câmaras [16].

Efetuada o raciocínio referido anteriormente, determinou-se  $\alpha_1$  através da equação (2.30), em que o ponto sobre o alvo se encontra na metade esquerda da imagem da esquerda.

$$\alpha_1 = \tan^{-1}\left(\frac{\left(\frac{l}{2} - x'\right)}{\frac{l}{2}} \cdot \tan \theta_1\right) \quad (2.30)$$

O  $\alpha_2$  é calculado com base na equação (2.23), por se encontrar na metade esquerda da imagem da direita.

$\beta$  é determinado através de:

$$\beta = (\alpha_2 - \alpha_1) \quad (2.31)$$

De modo a compreender melhor a equação (2.31), foram prolongados os eixos de interceção no ponto sobre o alvo provenientes dos centros das câmaras, conforme mostra a Figura 2.16.

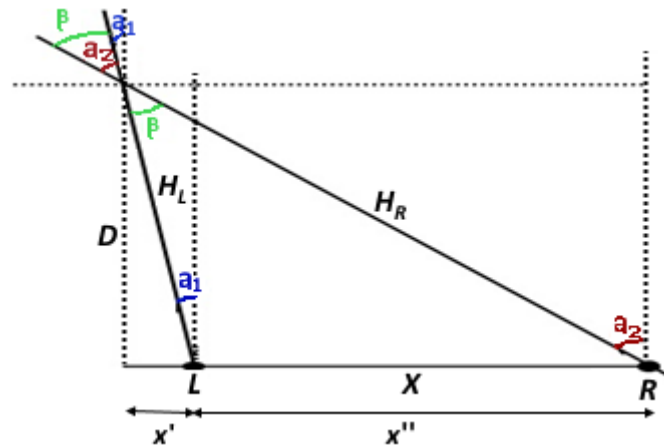


Figura 2.16 Representação geométrica para determinar  $\beta$ .

Se forem utilizadas as propriedades dos senos;

$$\frac{H_L}{\sin\left(\frac{\pi}{2} - \alpha_2\right)} = \frac{X}{\sin(\alpha_2 - \alpha_1)} \quad (2.32)$$

Resolvendo em ordem a  $H_L$ :

$$H_L = \frac{X \cdot \sin\left(\frac{\pi}{2} - \alpha_2\right)}{\sin(\alpha_2 - \alpha_1)} \quad (2.33)$$

$D$  é diretamente da Figura 2.15 com base na trigonometria:

$$D = \sin\left(\frac{\pi}{2} - \alpha_1\right) \cdot H_L \quad (2.34)$$

A equação (2.35) é o resultado da substituição de  $H_L$  na equação (2.34) pela a equação (2.33):

$$D = \frac{\sin\left(\frac{\pi}{2} - \alpha_1\right) \cdot \sin\left(\frac{\pi}{2} - \alpha_2\right) \cdot X}{\sin(\alpha_2 - \alpha_1)} \quad (2.35)$$

Quando o ponto sobre o alvo se encontra nas duas imagens na metade da direita,  $\alpha_1$  é dado pela equação (2.22) e  $\alpha_2$  por:

$$\alpha_2 = \tan^{-1} \left( \frac{\left( \frac{x'' - l}{2} \right) \cdot \tan \theta_2}{\frac{l}{2}} \right) \quad (2.36)$$

A profundidade é calculada a partir da equação (2.37):

$$D = \frac{\sin \left( \frac{\pi}{2} - \alpha_1 \right) \times \sin \left( \frac{\pi}{2} - \alpha_2 \right) \cdot X}{\sin(\alpha_1 - \alpha_2)} \quad (2.37)$$

### 2.6.3.3 Cálculo de profundidade quando o ponto se encontra no centro de uma das câmaras

Para finalizar será efetuada uma análise para o caso em que o ponto se encontra em frente a uma das câmaras. Na Figura 2.17 é possível observar o exemplo em que o ponto se encontra em frente à câmara esquerda.

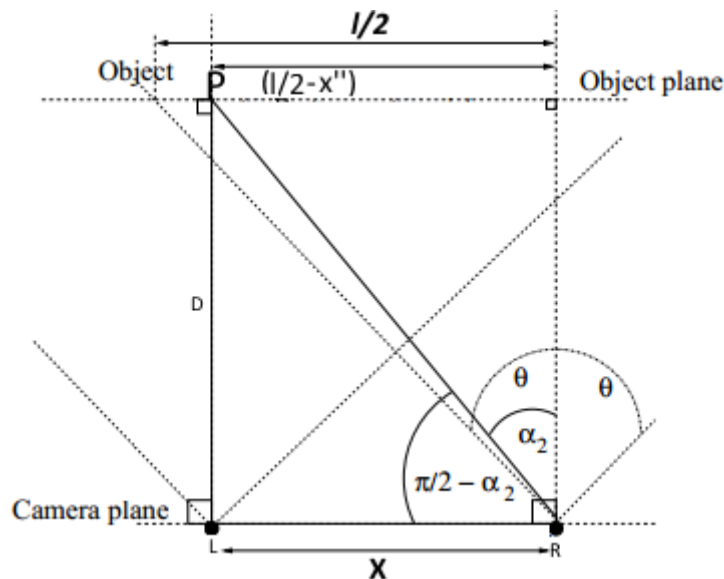


Figura 2.17 Geometria para o ponto exatamente em frente à câmara esquerda [16].

De uma forma simples, é possível obter  $D$  como sendo:

$$D = \tan \left( \frac{\pi}{2} - \alpha_2 \right) \cdot X \quad (2.38)$$

Para determinar  $\alpha_2$  será utilizada a equação (2.23) uma vez que o ponto sobre o alvo se encontra à esquerda na câmara da direita.

Caso o ponto sobre o alvo se encontre em frente à câmara da direita:

$$D = \tan \left( \frac{\pi}{2} - \alpha_1 \right) \cdot X \quad (2.39)$$

Sendo que  $\alpha_1$  é determinado a partir da equação (2.22) por se encontrar à direita da câmara da esquerda.

Este segundo algoritmo é mais complexo, relativamente ao anterior, uma vez que exige mais do que uma equação para determinar a profundidade. A equação a ser utilizada é determinada a partir da localização do ponto sobre o alvo nas imagens.

### 2.6.4 Terceiro método de cálculo da profundidade

No terceiro e último método de cálculo da profundidade, demonstra-se como calcular a distância das câmaras até ao ponto sobre o alvo, com base na Figura 2.18.

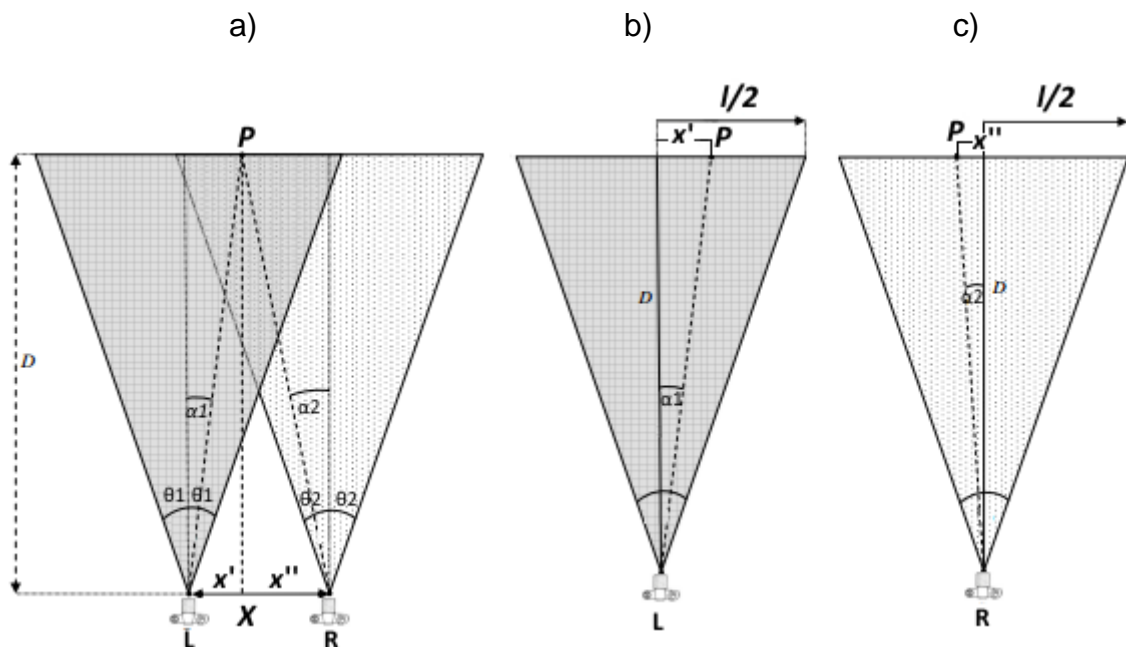


Figura 2.18 Objeto entre as câmaras: a)duas câmaras, b)câmara da esquerda, c) câmara da direita [23].

Através da Figura 2.18 a) obtém-se:

$$X = X' + X'' = D \cdot \tan \alpha_1 + D \cdot \tan \alpha_2 \quad (2.40)$$

Resolvendo em ordem a D:

$$D = \frac{X}{\tan \alpha_1 + \tan \alpha_2} \quad (2.41)$$

Continuando a resolver em ordem a  $D$ , agora através da Figura 2.18 b):

$$\frac{X'}{\frac{l}{2}} = \frac{\tan \alpha_1}{\tan(\theta)} \Leftrightarrow \tan \alpha_1 = \frac{\tan(\theta) \cdot X'}{\frac{l}{2}} \quad (2.42)$$

Também através da Figura 2.18 b) e resolvendo em ordem a  $D$ :

$$\frac{-X''}{\frac{l}{2}} = \frac{\tan \alpha_2}{\tan(\theta)} \Leftrightarrow \tan \alpha_2 = \frac{-X'' \cdot \tan(\theta)}{\frac{l}{2}} \quad (2.43)$$

Substituindo na equação (2.41) as equações (2.42) e (2.43) obtém-se:

$$D = \frac{X}{\left(\frac{\tan(\theta) \cdot X'}{\frac{l}{2}}\right) + \left(\frac{-X'' \cdot \tan(\theta)}{\frac{l}{2}}\right)} = \frac{l \cdot X}{2 \tan(\theta) (X_L - X_R)} \quad (2.44)$$

Esta forma de calcular a profundidade utiliza a trigonometria no cálculo e determina a profundidade com apenas uma equação [23].

### 2.6.5 Cálculo de dimensões de estruturas

A medição de estruturas neste algoritmo é realizada através da seleção de dois pontos sobre o alvo, traçando um segmento de reta entre estes, e determinado a sua dimensão.

É necessário determinar uma escala para calcular a distância do segmento de reta, no entanto, para atribuir essa escala é essencial ter em consideração a profundidade.

A distância entre os dois pontos sobre o alvo é obtida com base no Teorema de Pitágoras, conforme representado na Figura 2.19, sendo a distância pretendida,  $d$ .

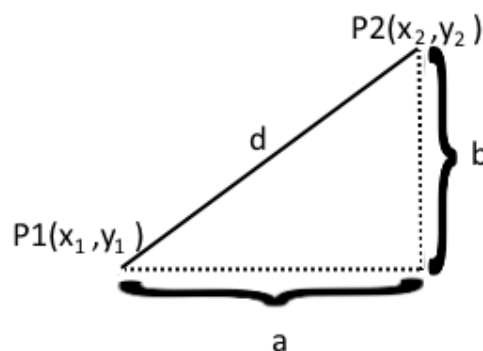


Figura 2.19 Geometria elementar para determinar  $d$ .

$$d = \sqrt{a^2 + b^2} \quad (2.45)$$

Sendo  $a$  e  $b$  obtidos a partir de:

$$a = x_1 - x_2 \text{ e } b = y_1 - y_2 \quad (2.46)$$

Estes valores são calculados por unidade de *pixéis*. Para os converter em unidades de distância no sistema internacional (S.I.), sabe-se que um *pixel* é quadrado e um lado mede  $3 \mu\text{m}$ , no entanto, não basta multiplicar diretamente

o tamanho do *pixel* pela quantidade de pixels entre os pontos selecionados sobre o alvo para o cálculo da distância. É necessário também multiplicar por um ganho ajustável de acordo com a profundidade média a que os pontos se encontrem. Por exemplo, se forem obtidas duas fotos de uma régua em frente a câmara *stereo* uma a curta profundidade e outra a longa profundidade, para curtas profundidades verifica-se que existe maior quantidade de *pixels* para distância de um milímetro relativamente a profundidades maiores. Assim sendo é necessário determinar, um ganho ajustável para a medição das distâncias que varia com a profundidade.

Posteriormente, o segmento de reta da distância é calculado através da média das retas obtidas na imagem da esquerda e da direita, tornando o cálculo mais preciso.

## 2.7 Correlação dos pontos na imagem *stereo*

O cálculo da profundidade é realizado através da localização de um determinado ponto nas duas imagens *stereo*, pelo que existe a necessidade de um mecanismo que de forma automática consiga localizar um ponto sobre o alvo [20].

Com base em métodos conhecidos um determinado ponto ou pontos sobre as imagens *stereo* podem ser correlacionados de diversas formas, tais como a correlação por cor ou por máxima variância [22]. Outros métodos utilizam conjuntos de pixels de uma determinada região de interesse organizados em matrizes [23],[24], conforme representado nas figuras seguintes, onde será explicado como se efetuou essa sincronização.

Tendo por base a Figura 4.20 seleciona-se na imagem da esquerda um determinado ponto correspondendo a um *pixel*, no centro de uma determinada matriz quadrada de pesquisa, denominada  $I_L(N \times N)$ , assinalada com a cor vermelha. O ponto sobre o alvo é pesquisado dentro de uma região da matriz  $I_R(M \times N)$ , em que  $M > N$ , localizada na imagem à direita e representada a verde, sendo que a posição vertical de  $I_R$  depende de  $I_L$  analisada na imagem à esquerda. A limitação dentro da imagem na região de pesquisa, otimiza assim a sincronização do ponto sobre o alvo nas imagens *stereo* [23].

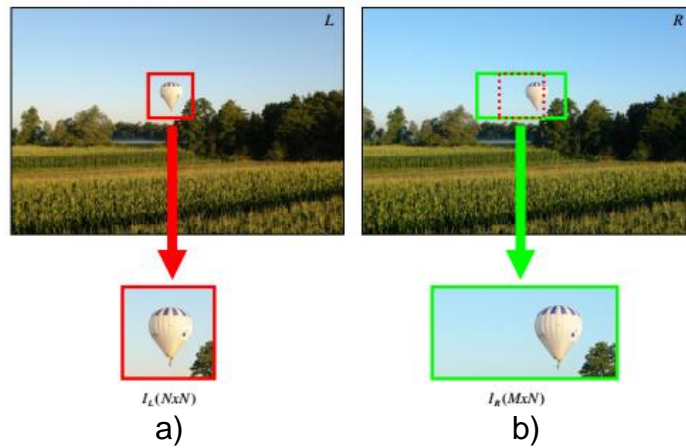


Figura 2.20 Região de interesse: a) a cor vermelho a matriz de pesquisa e b) a cor verde a matriz a ser pesquisada [23].

Posteriormente com base na Figura 2.21, desloca-se na horizontal a matriz da esquerda sobre a da direita com o deslocamento *pixel a pixel*, efetuando-se a subtração das matrizes a cada deslocamento até ser encontrada a posição de sincronização.

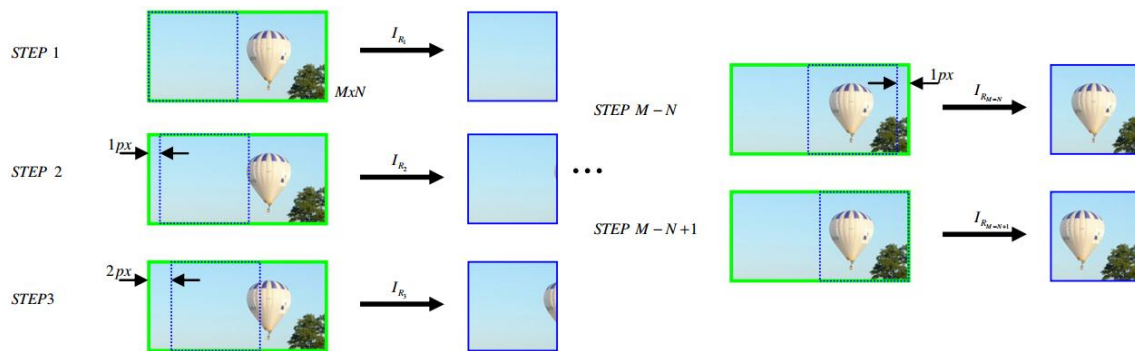


Figura 2.21 Processo para encontrar a submatriz na imagem da direita [23].

Com base na Figura 2.22,  $I_i$  corresponde à matriz resultante da subtração de entre a matriz de pesquisa da imagem da esquerda e uma matriz da direita na região de interesse. A sincronização ocorre quando o valor resultante da média na matriz  $I_i$  for o mais baixo encontrado. Verifica-se ainda que na Figura 2.22 no exemplo 1, as matrizes não estão sincronizadas e no exemplo 2 as matrizes estão sincronizadas.

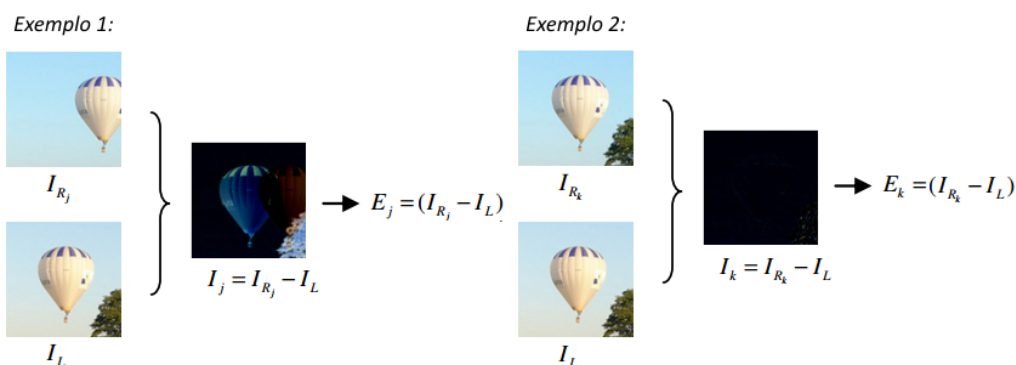


Figura 2.22 Exemplo 1: Matizes não sincronizadas e Exemplo 2: Matrizes sincronizadas [23].

O processo implementado de pesquisa do ponto de interesse na segunda imagem apresenta algumas diferenças relativamente ao método apresentado acima, em que o cálculo para a validação da posição é baseado na média da matriz resultante da diferença entre matrizes. O método criado baseia-se na validação da posição correta através da atribuição de um peso, em cada comparação de matrizes, sendo realizada a comparação da matriz  $I_L$  até encontrar a posição dentro de  $I_R$ , em que o objeto a pesquisar se sobrepõe, correspondendo à localização que possui o menor valor de erro. O peso é atribuído através da subtração das matrizes, sendo na matriz resultante contabilizada a quantidade de posições cujo valor seja superior ao módulo da margem de erro em valores de DN predefinido.

Posteriormente, será apresentado mais detalhadamente o procedimento para esta sincronização.

A pesquisa não pode ser realizada considerando apenas um *pixel*, por existirem elevados níveis de ambiguidade pelo que são utilizadas matrizes, com amostras a envolverem o ponto selecionado em ambas as imagens *stereo*, de modo a aumentar a precisão da sincronização. Todavia, é necessário ter em conta o tamanho da matriz com a amostra, pois quanto maior for o seu tamanho, mais termos de comparação na sincronização do ponto selecionado sobre o alvo. No entanto, implica uma maior quantidade de processamento, pelo que será necessário realizar um estudo para encontrar o compromisso entre o tamanho da matriz e o tempo de processamento.

Para que a pesquisa seja realizada com sucesso é relevante que a tonalidade em ambas as imagens seja o mais próxima possível, facilitando deste modo a sincronização do ponto escolhido sobre o alvo.

## 2.8 Software de desenvolvimento

Após um estudo da plataforma onde seriam implementados os diversos algoritmos, optou-se pela escolha do *software* MATLAB<sup>®</sup> através da plataforma

GUIDE, visto que é uma ferramenta com grandes potencialidades de cálculo, que permite efetuar diversas simulações, sendo amplamente utilizada no âmbito das engenharias [25].

A plataforma GUIDE, permite criar *users interfaces* de uma forma mais interativa, onde podem ser associadas diversas ferramentas, tais como: botões; caixas de texto; representação de imagens, entre outras, sendo possível efetuar interações entre as mesmas. De referir que esta ferramenta foi fundamental para testar o código com os diversos algoritmos [25].

## 2.9 Componentes utilizados

Serão de seguida apresentados os componentes utilizados neste projeto, bem como as suas características.

### NanEye Stereo

O NanEye Stereo, representada na Figura 2.23, é um sensor de imagem de pequenas dimensões que contém eletrónica incorporada junto à área de captura de imagem, que permite a conversão analógica digital (ADC), a transmissão de dados em série de 10 bits, ou seja, 1024 níveis sobre uma interface *Low Voltage Differential Signaling* (LVDS). O sistema de comunicação proprietário da AMS permite a transmissão de dados por um cabo até 3m,,



Figura 2.23 Sensor NanEye Stereo [4].

Com matrizes de dimensão 250X250 *pixéis* e cada *pixel* com dimensão de 3X3  $\mu\text{m}$ , este sensor opera com uma taxa de transmissão de 44 fps. Após a sua assemblagem a sua dimensão exterior é de 2,2X1 mm e a profundidade é 1,6 mm. A potência média consumida pelo sensor é de 4,2 mW para uma tensão de 2,1 V. Possui uma, F#2,7 e foco (*f*) de 0,375 mm.

### EFM02 e placa NanoUSB3

Na Figura 2.24 são apresentadas duas placas sobrepostas, sendo que que a placa superior é uma placa NanoUSB3, desenvolvida pela AMS, que contém 4 conectores de ligação da NanEye. Os conectores permitem ainda efetuar a ligação de *Light Emitting Diodes* (LED) com controlo dinâmico de luminosidade.

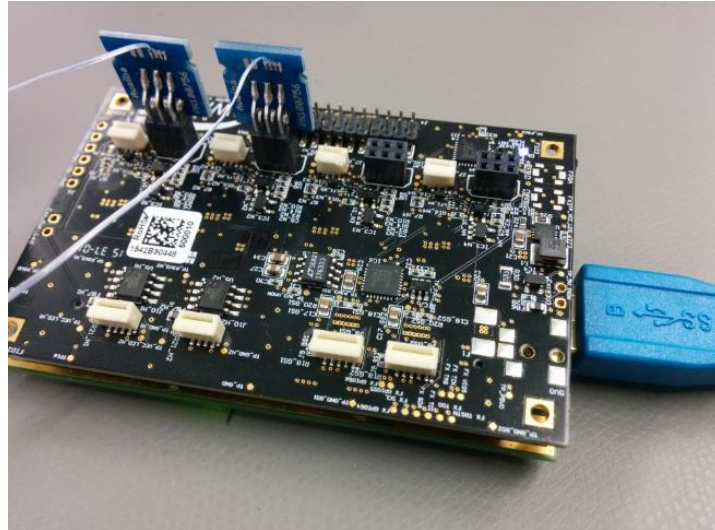


Figura 2.24 FPGA com placa de desenvolvimento de interface de ligação do NanEye Stereo.

A placa NanoUSB3 é conectada à placa EFM02 que inclui uma FPGA Spartan 6, xc6slx45, com *interface* de ligação USB 3.0, através de um *software* proprietário que controla toda a operação de captura de imagem e vídeo. Este *software* pode ser descarregado na página do fabricante.

A potência necessária para este sistema depende da configuração, que inclui os componentes que se encontram ligados, e da forma como o *software* se encontra a operar.

Foi medida a corrente com um amperímetro em série na entrada da FPGA. A configuração incluía apenas a placa EFM02, a placa NanoUSB3 e o *software* do sensor NanEye a operar em modo normal. O valor medido foi de 489 mA [4].

## Projektor de linha

O LxZ1-PB01(Blue) do fabricante Philips LumiLEDs é um projetor de linhas, utilizado na projeção de luz sobre o alvo, de forma a auxiliar na validação dos pontos seleccionados sobre os alvos escolhido nas duas imagens, representado na Figura 2.25.

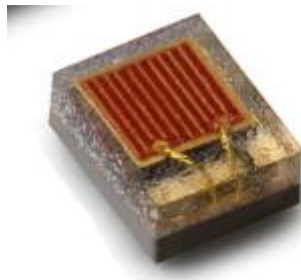


Figura 2.25 Philips Lumiledes Modelo LxZ1-PB01(Blue).

Este componente pode operar com níveis de tensão de 2,5 V a 3,50 V. Em termos de consumo foi medida para uma tensão de 2,7 V, uma corrente de 80  $\mu$ A. As suas dimensões são de 1,3X1,7 mm e a altura 0.53 mm.

De forma a melhorar e aumentar a direção da luz projetada foi assemblada uma lente utilizada no NanEye, visto que as dimensões são da mesma ordem de grandeza.

### **LED de luminosidade**

Como fonte de luz foi utilizado o LED produzido pela *Everlight*, modelo SMD-B 16-219 A, com um tamanho de 1x0,5 mm, que opera com tensões típicas entre 2,7 V a 3,2 V, e correntes que variam entre 4 a 12 mA, e com um fluxo luminoso de 140 a 360 mcd [27].

### 3. Hardware

Neste capítulo será apresentada a evolução da componente de *hardware* até à versão final.

Inicialmente criou-se uma plataforma de testes para realizar as experiências, em que os requisitos principais eram: suporte físico para o alvo e o sensor NanEye e possibilidade de alterar a distância entre o alvo e o sensor NanEye.

Antes de se utilizar o equipamento NanEye *Stereo* começou-se a trabalhar com o NanEye 2D, de forma a se familiarizar com o equipamento, com a diferença de que as imagens *stereo* desta montagem eram obtidas em instantes diferentes e através do deslocamento manual no eixo dos x, para se obter a perspetiva das imagens *stereo*, conforme a Figura 3.1.

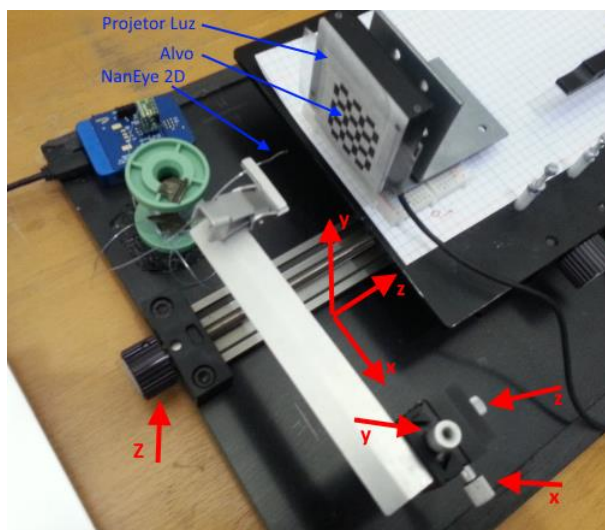


Figura 3.1 Primeiro cenário de testes.

O primeiro cenário de testes foi essencial, permitindo retirar diversas conclusões de forma a evoluir o sistema, das quais se destacam: o facto de o alvo se encontrar sobre um projetor de luz era prejudicial para a captura da imagem, sendo a forma mais correta de incorporar a luz de iluminação junto ao sensor, a incidir sobre todo o cenário; o sensor NanEye 2D deveria ser substituído pelo sensor NanEye *Stereo*; a plataforma deveria ser de dimensões mais reduzidas e com mais precisão na variação da profundidade; e por fim deveria-se proceder à introdução de um projetor de linhas que incidisse sobre o alvo, de modo a obter referências nas imagens *stereo*.

Posto isto, criou-se um novo cenário de testes, em que o LED de iluminação e o projetor de linhas foram conectados a uma fonte de alimentação, sendo o projetor ainda controlado por um interruptor de pressão, conforme a Figura 3.2.

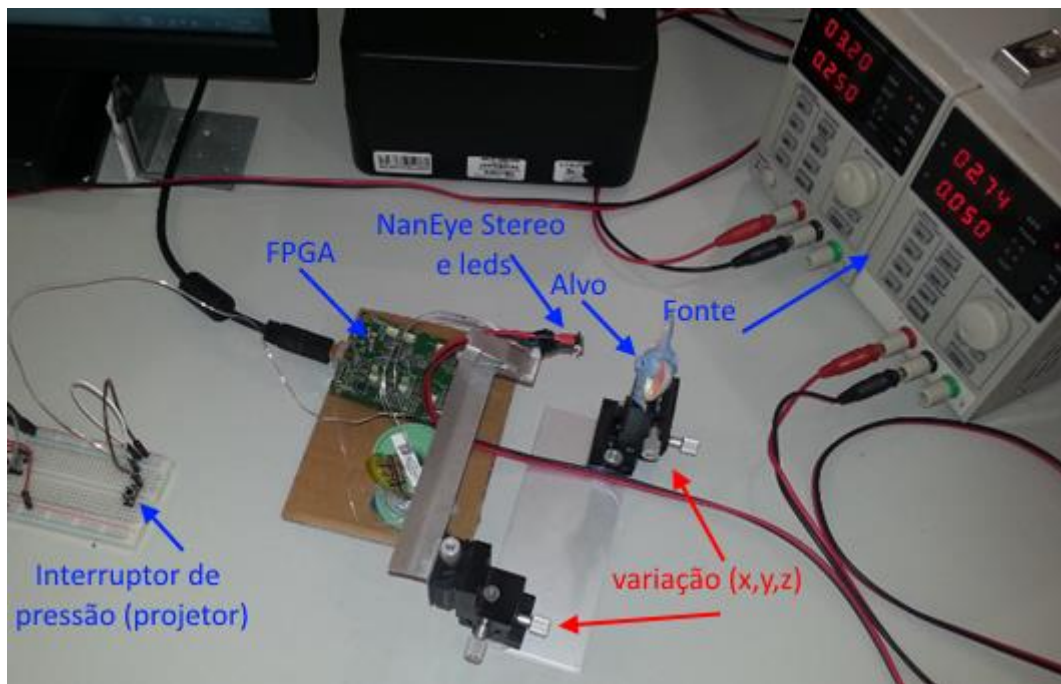


Figura 3.2 Segundo cenário de testes.

De forma a verificar o comportamento do projetor de linhas, aplicou-se sobre um alvo, obtendo-se o resultado apresentado na Figura 3.3.

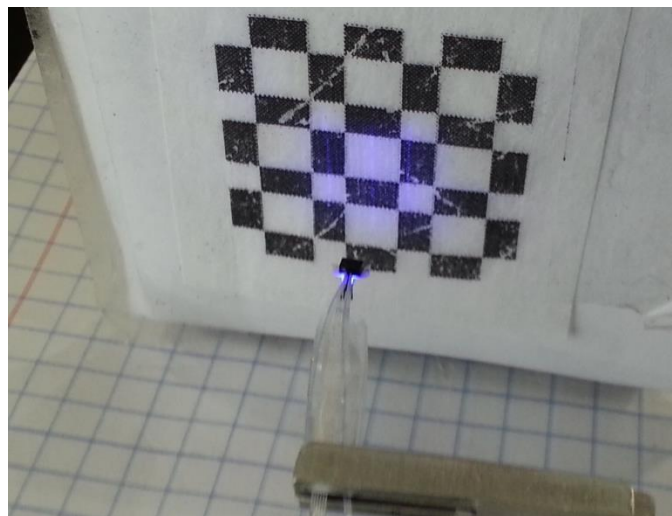


Figura 3.3 Projetor de linhas sobre um alvo.

E as imagens *stereo* ilustradas na Figura 3.4.

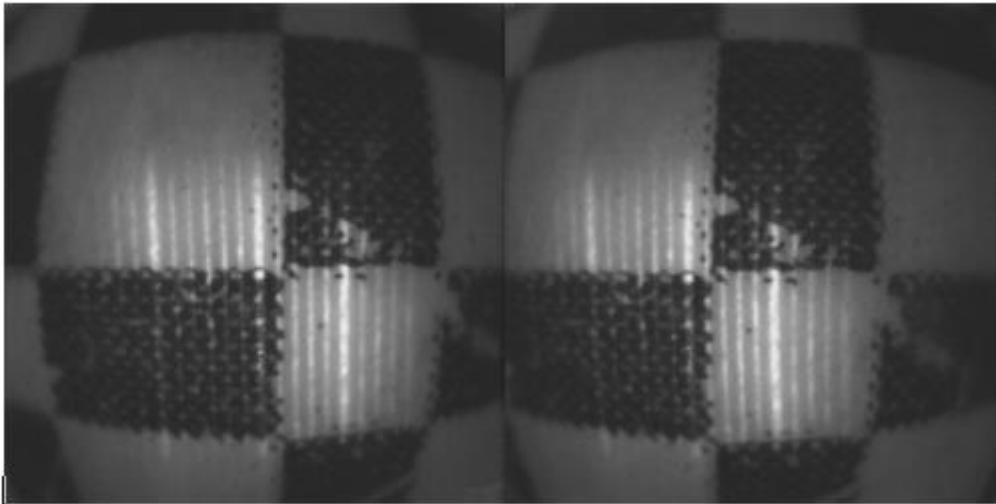


Figura 3.4 Imagens *stereo* com base no terceiro cenário.

Para o terceiro cenário, trabalhou-se a componente de “captura de imagem” constituída por dois LED e o sensor NanEye Stereo. Na Figura 3.5 encontra-se representada a perspectiva de frente e de lado, correspondente à montagem. Considerando o plano de frente, na parte superior encontra-se o LED de iluminação, no centro o sensor NanEye Stereo, e na parte inferior o LED projetor de linhas. Na vista lateral existe um adaptador de ângulo assinalado com o formato de cunha, que se encontra entre a NanEye e o projetor. Esta peça foi criada manualmente, e o seu ângulo determinado através de cálculo com base nas imagens *stereo*, com e sem o adaptador de ângulo. O valor obtido do ângulo foi de 0,175 rad, a uma distância nominal de 15 mm. O objetivo era direcionar os feixes de luz do projetor para o centro da imagem *stereo*, de modo que incidissem sobre o alvo de forma mais precisa [4].

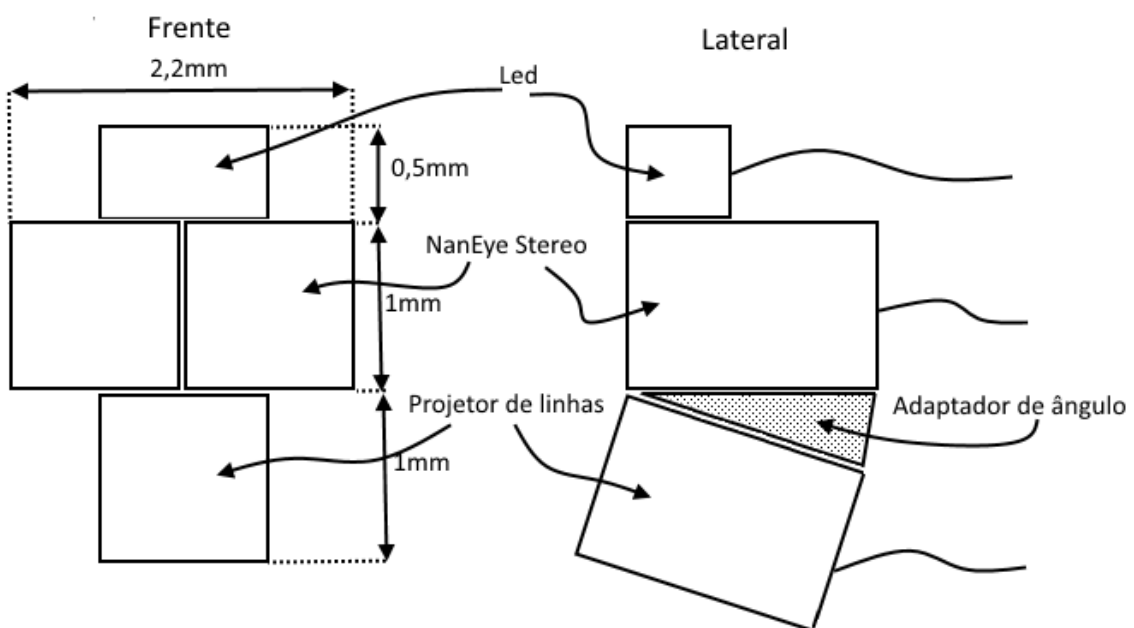


Figura 3.5 Componentes junto à captura da imagem.

Todos estes componentes foram montados dentro de uma manga retrátil, ficando acomodados de forma robusta, conforme a Figura 3.6.

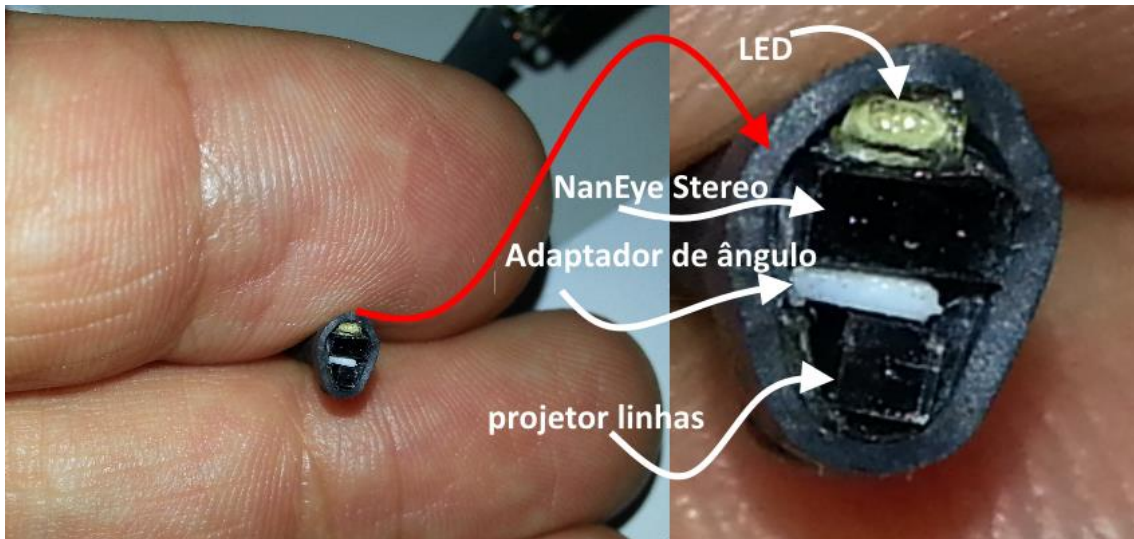


Figura 3.6 Vista de frente do sistema de captura da imagem.

Sendo que, o sensor NanEye Stereo é composto por dois sensores NanEye 2D, como é possível verificar na Figura 3.7,

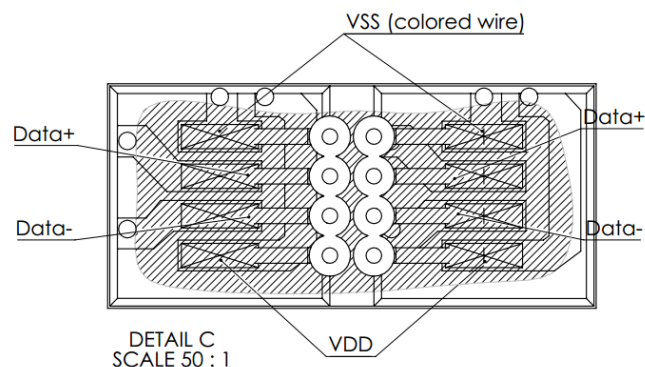


Figura 3.7 Pistas de ligação do sensor NanEye stereo [4].

Quanto à potência necessária para todo o sistema, não foi possível medir um valor exato, uma vez que este dependia do modo de operação. No entanto, foi efetuada uma estimativa, considerando uma tensão de 5 V na porta USB 3.0, a corrente necessária podia variar entre 500 a 600 mA para todo o sistema.

O resultado do terceiro cenário de testes encontra-se representado, na Figura 3.8.

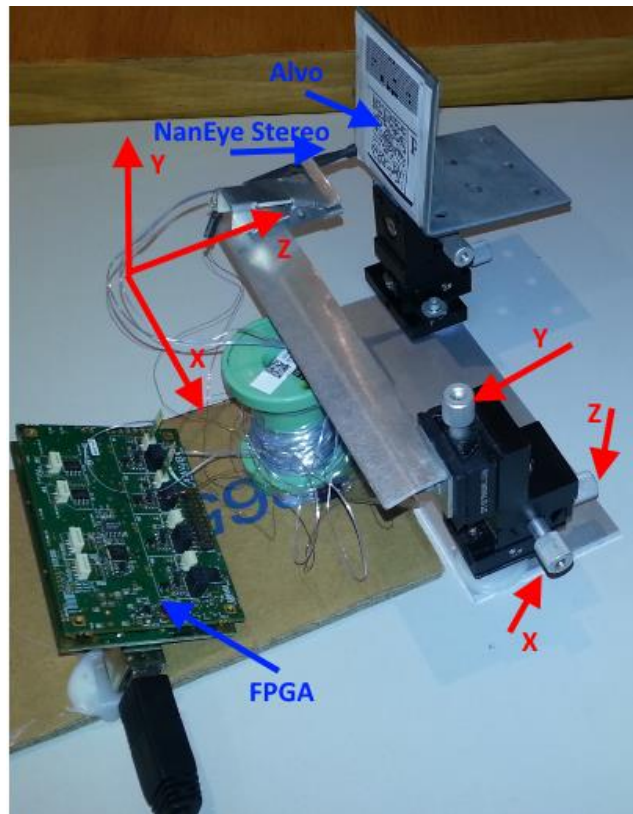


Figura 3.8 Terceiro cenário de teste.

Após terem sido efetuados diversos testes para as calibrações, foi possível comprovar que o sistema estava preparado para operar em condições de pouca luminosidade, como é o caso do interior do corpo humano.



## 4. Implementação inicial

No presente capítulo será discutida a implementação da plataforma criada, e com a qual foram obtidos os primeiros resultados.

### 4.1 User interface inicial

Efetuar-se-iam diversas pesquisas de modo a determinar distâncias em profundidade, e verificou-se a necessidade de se criar uma plataforma onde os princípios estudados pudessem ser implementados e testados. De referir, que esta plataforma sofreu algumas alterações conforme o sistema foi evoluindo.

Inicialmente selecionou-se uma imagem ao acaso de 1024x768 *pixéis*, na qual foram escolhidas duas imagens de 250X250 *pixéis*, com um desfaseamento de 50 *pixéis*, resultando na imagem “*stereo*” da esquerda (imagem L) e na imagem “*stereo*” da direita (imagem R), de forma a facilitar a primeira implementação do algoritmo.

Nesta primeira fase não foram considerados os valores calculados das profundidades, tendo sido tido em conta apenas a criação de todo o *user interface*, incluindo a apresentação das imagens e os dados referentes à sincronização do ponto sobre o alvo, conforme representado na Figura 4.1.

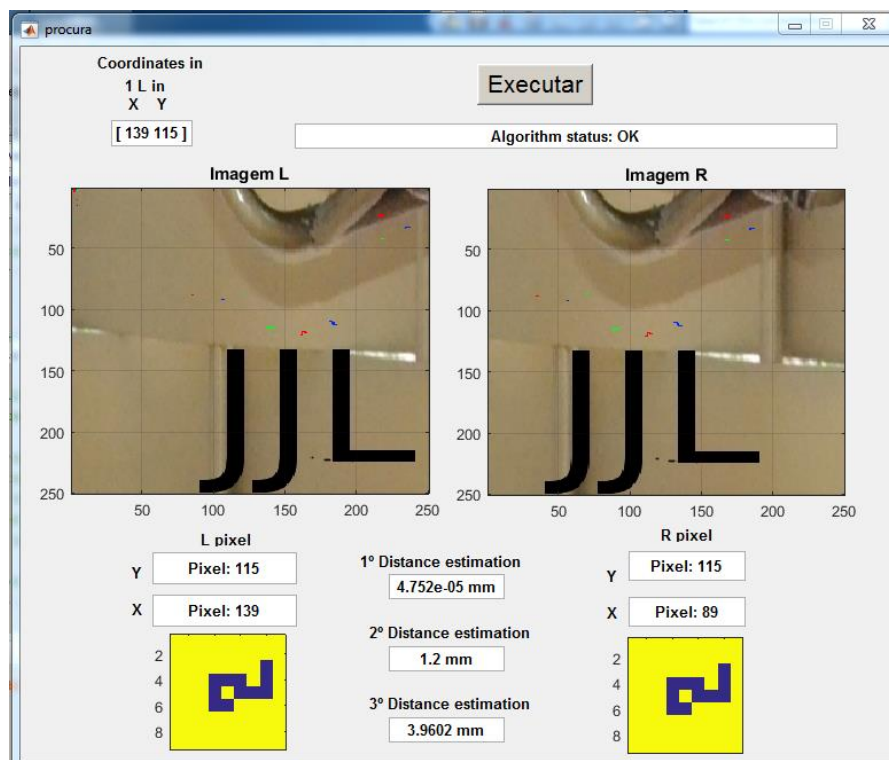
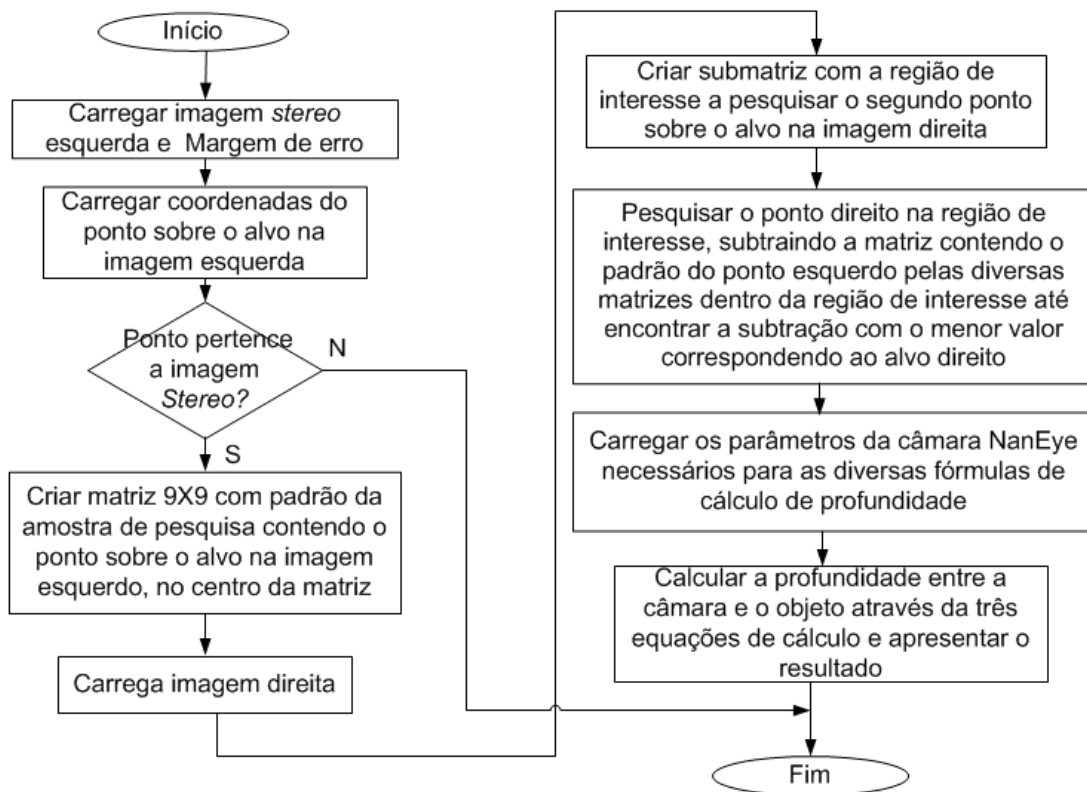


Figura 4.1 User interface da plataforma inicial.

A forma de operar baseava-se na introdução das coordenadas do ponto sobre o alvo esquerdo ( $P_L$ ) representado na caixa de texto no canto superior

esquerdo (*Coordinates in*). Posteriormente era pressionando o botão “Executar” e obtinham-se o ponto sobre o alvo direito ( $P_R$ ) de forma automática. Os cálculos de profundidades são efetuados com base nas coordenadas do ponto sobre o alvo  $P_L$  e  $P_R$ , e posteriormente representadas as coordenadas encontradas, os cálculos das distâncias, bem como as representações na parte inferior do *user interface* das imagens das regiões correspondentes ao ponto sobre o alvo  $P_L$  e  $P_R$  no centro das imagens.

De forma a compreender o funcionamento da plataforma, criou-se o Fluxograma 4.1.

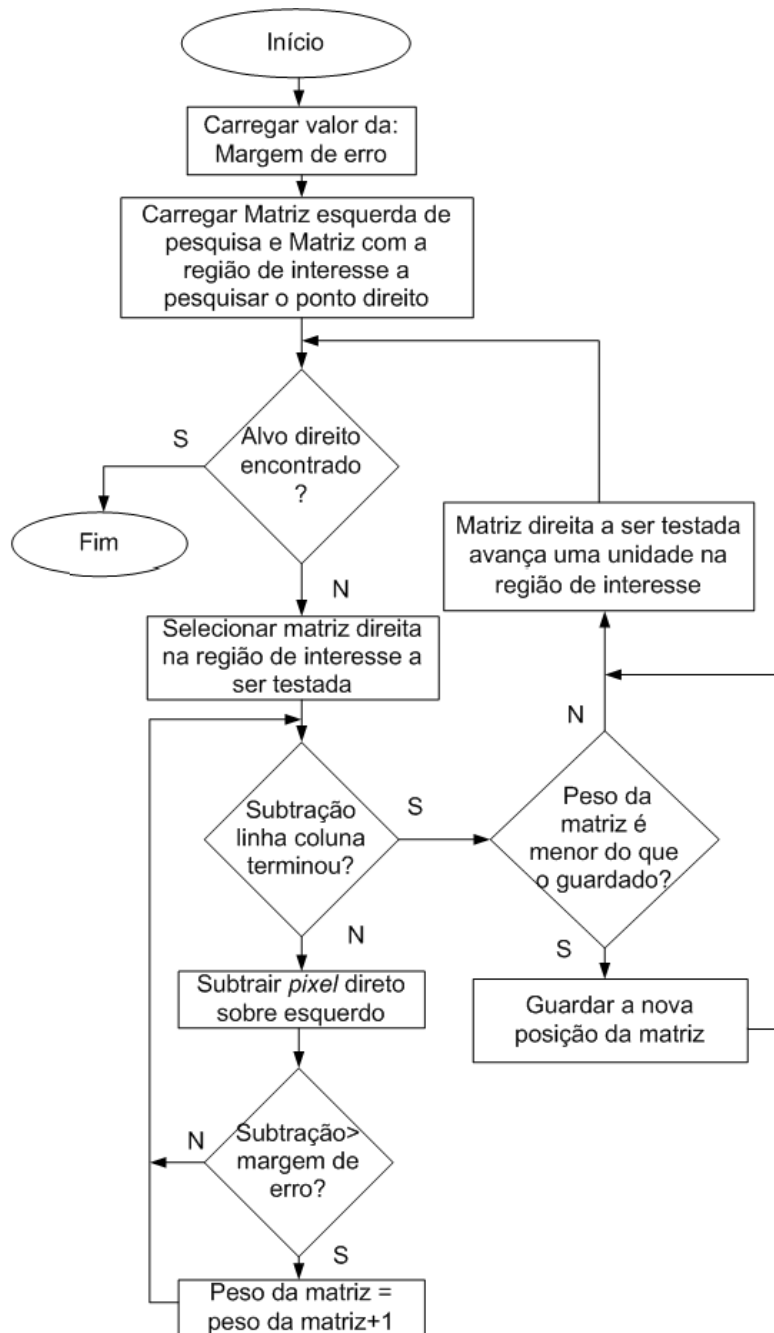


Fluxograma 4.1 *User interface* da plataforma inicial.

Nas etapas seguintes trabalhou-se com as imagens obtidas a partir do sensor NanEye *stereo*.

## 4.2 Validação do ponto sobre o alvo na imagem *stereo*

Com a utilização de imagens *stereo*, a validação do ponto sobre o alvo torna-se uma tarefa complexa, uma vez que existem diversas diferenças entre a imagem da direita e a da esquerda, por fatores tais como, por exemplo, a distorção na imagem, que serão abordados ao longo deste projeto. Assim sendo, houve necessidade de criar um algoritmo simples, para a sincronização do ponto sobre o alvo nas duas imagens. Deste modo, criou-se o Fluxograma 4.2, de forma a compreender como foi efetuada a pesquisa do ponto sobre o alvo na segunda imagem.



Fluxograma 4.2 Validação do ponto sobre o alvo na imagem *stereo*.

Neste algoritmo existem parâmetros que podem ser ajustados com vista a uma melhor sincronização, podendo ser ajustada a sensibilidade na pesquisa, através do valor definido como margem de erro, que corresponde ao valor limite em DN, na validação da subtração entre os dois *pixels*. Se o módulo do resultado for inferior à margem de erro é considerado correto, caso contrário corresponde a um erro que é contabilizado na validação da matriz, relativamente à posição do ponto sobre o alvo na imagem da direita. Também pode ser ajustado o tamanho da matriz, contendo o padrão de pesquisa - quanto maior for a matriz, maior será a possibilidade de ser validado o ponto sobre o alvo. No entanto, exige um compromisso entre o tamanho da matriz e o

tempo de processamento, pelo que a matriz com o padrão de pesquisa deve ser suficientemente grande para uma melhor validação e com a menor quantidade de processamento possível, tornando o sistema eficaz e rápido.

Por definição, considerou-se a seleção do ponto sobre o alvo na imagem da esquerda e a pesquisa na imagem da direita.

#### 4.2.1 Análise da sensibilidade de erro

Após ter sido implementado o algoritmo anterior, surgiu a necessidade de efetuar um estudo, para verificar qual a melhor margem de erro a considerar para a validação do ponto sobre o alvo, durante a subtração das matrizes.

Na primeira experiência considerou-se um ponto sobre o alvo plano com uma profundidade de 5,51 mm e utilizou-se a plataforma que se encontra representada na Figura 4.2, onde é possível observar uma barra deslizante que permite definir a margem de erro.

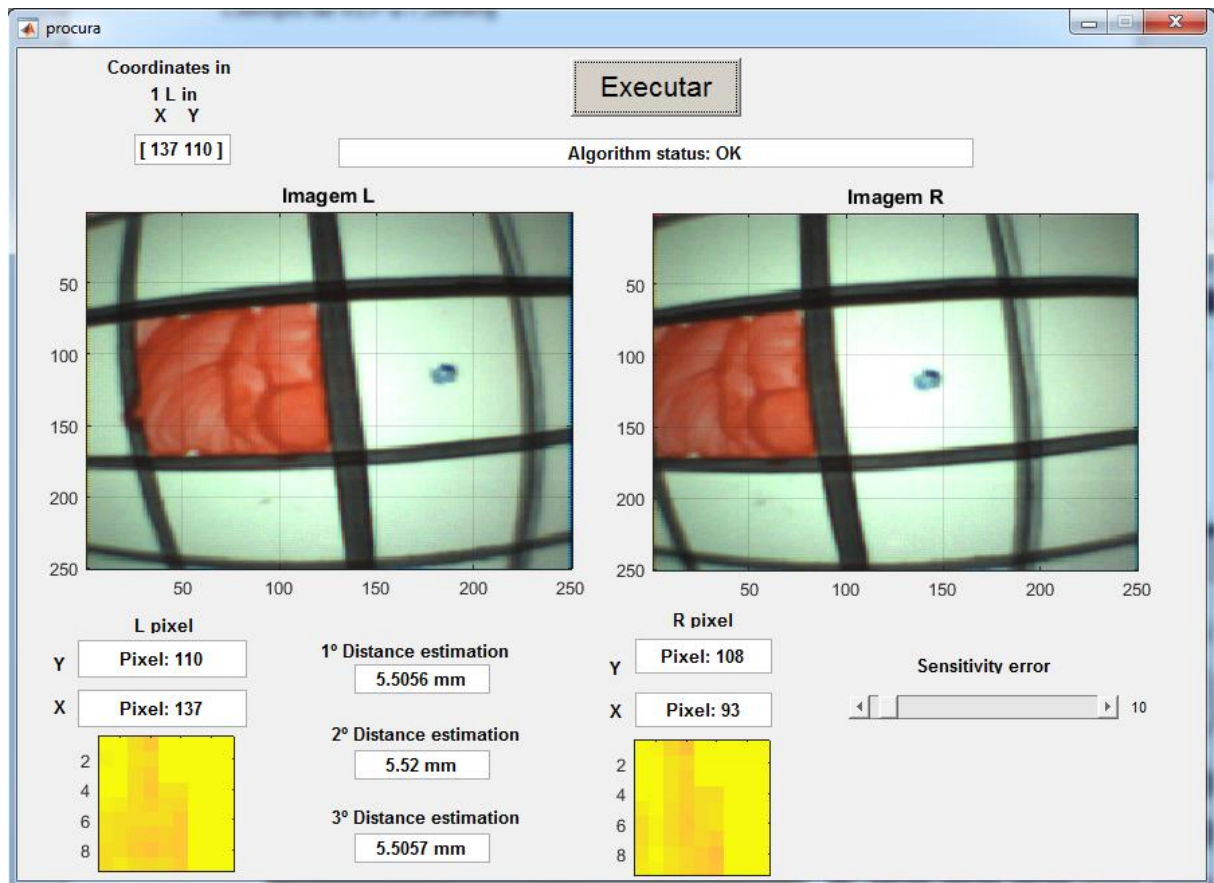


Figura 4.2 *User interface* utilizado no estudo da margem de erro da validação do ponto sobre o alvo.

Para esta experiência selecionaram-se 5 pontos aleatórios sobre o alvo conforme assinalado na imagem da esquerda representada na Figura 4.3,

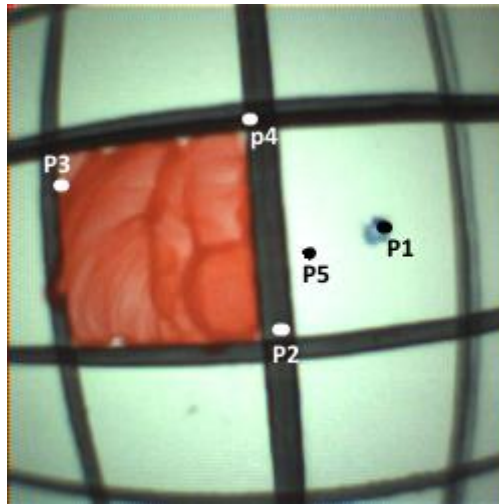


Figura 4.3 Imagem da esquerda com os cinco pontos assinalados sobre o alvo.

Sendo que, em cada ponto sobre o alvo foram aplicadas margens de erro de 5, 10, 20 e 30 valores em DN.

Com base nos dados obtidos, elaborou-se o gráfico representado na Figura 4.4, em que no eixo das abscissas foram considerados os cinco pontos sobre o alvo e no eixo das ordenadas a profundidade determinada em cada ponto sobre o alvo. Cada linha representa uma margem de erro anteriormente referida.

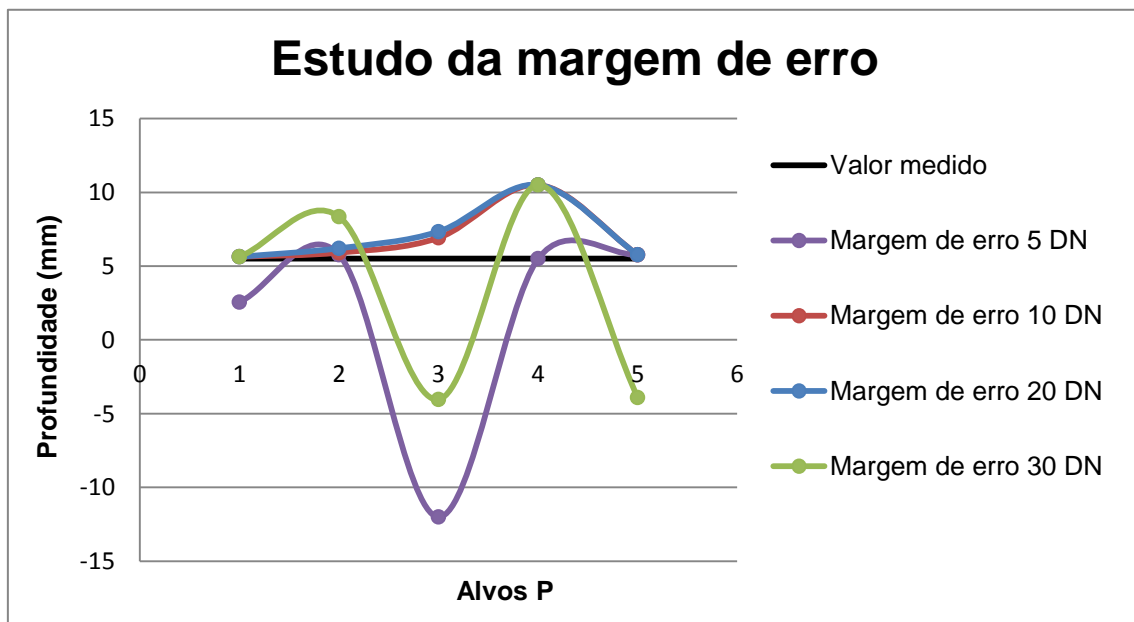


Figura 4.4 Estudo da margem de erro.

Analisando o gráfico, verifica-se que as margens de erro de 10 DN e 20 DN são as que melhor conseguem detetar os pontos sobre o alvo. Quanto às restantes margens de erros, existem erros de ambiguidade na margem de 5 DN, por ser

uma margem curta, e na margem de 30 DN, por ser uma margem maior do que a desejada.

Existem pontos sobre alguns alvos que são mais facilmente detetados do que outros, sendo possível observar este facto através da tendência das linhas, relativas a cada ponto sobre o alvo. Uma vez que os pontos  $P_1, P_2$  e  $P_5$  sobre o alvo, se encontram mais próximos do centro da imagem conseguem-se obter melhores resultados na distância do ponto sobre o alvo, conforme seria de esperar, visto que é a região da imagem que apresenta menor distorção provocada pela lente. Os pontos sobre os alvos com maior distorção, serão corrigidos posteriormente.

#### 4.2.2 Correção para profundidades negativas

Na experiência anterior verificou-se que existiam estimativas de profundidades negativas, sendo interpretadas como erros. Este comportamento é causado pela forma como é efetuada a pesquisa do ponto sobre o alvo na segunda imagem.

De acordo com a teoria da visão *estereoscópica* [11], se for selecionado um *pixel* numa imagem, neste caso na imagem da esquerda, o *pixel* correspondente na imagem da direita obrigatoriamente terá coordenadas à esquerda relativamente ao ponto sobre o alvo inicial, conforme representado na Figura 4.5.

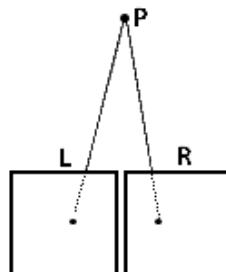


Figura 4.5 Figura geométrica da representação do ponto P sobre o alvo nas imagens *stereo*.

De forma a compreender a situação foi criada a ilustração do cenário na Figura 4.6. Caso o ponto sobre o alvo seja detetado com coordenadas para o lado direito, o valor da profundidade será negativo, correspondendo a um erro, conforme a Figura a).

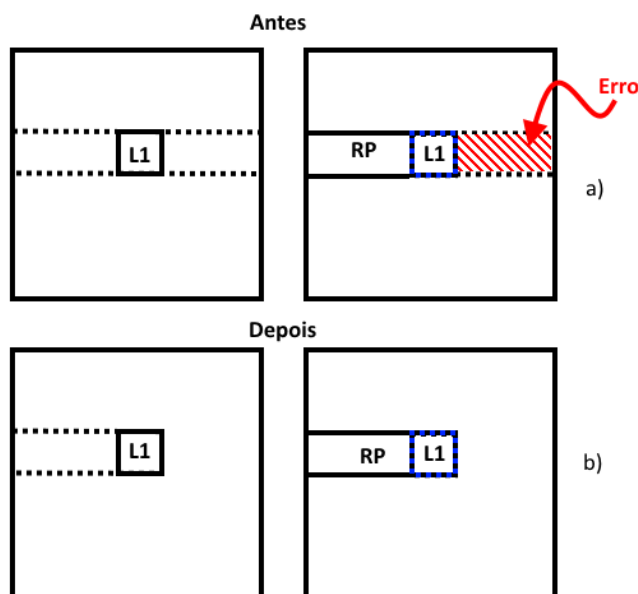


Figura 4.6 Cenário de pesquisa do ponto sobre o alvo: a) pesquisa errada, b) pesquisa correta.

A solução para a correção dos valores negativos na profundidade passa por limitar a pesquisa na região de interesse, para o lado direito conforme representado na Figura b).

Para que o ponto sobre o alvo fosse mais facilmente detetado, durante a pesquisa na imagem da direita, alterou-se a ordem de pesquisa na região de interesse, passando a ser efetuada da direita para a esquerda e percorrendo as linhas pela ordem assinalada na Figura 4.7.

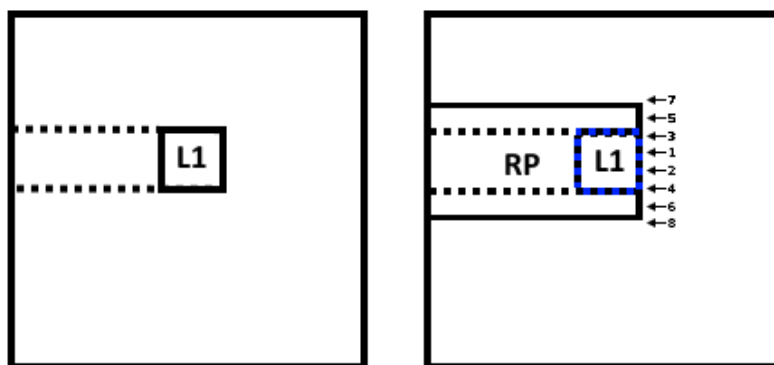


Figura 4.7 Demonstração da pesquisa do ponto sobre o alvo na imagem da direita.

Esta alteração permitiu aumentar a probabilidade de encontrar o padrão correto, eliminando algumas ambiguidades durante a validação do alvo. Verificou-se ainda, que após esta correção os pontos sobre o alvo foram determinados com maior precisão e de forma mais rápida.

### 4.3 Identificação do ponto selecionado sobre o alvo

Apesar de na interface desenvolvida existirem janelas, onde se encontram representadas as regiões selecionadas na imagem da direita e da esquerda

para o cálculo de profundidade, surgiu a necessidade de assinalar sobre as imagens essas regiões. Na Figura 4.8 encontra-se o exemplo de como eram assinaladas as regiões sobre a imagem com a cor vermelha.

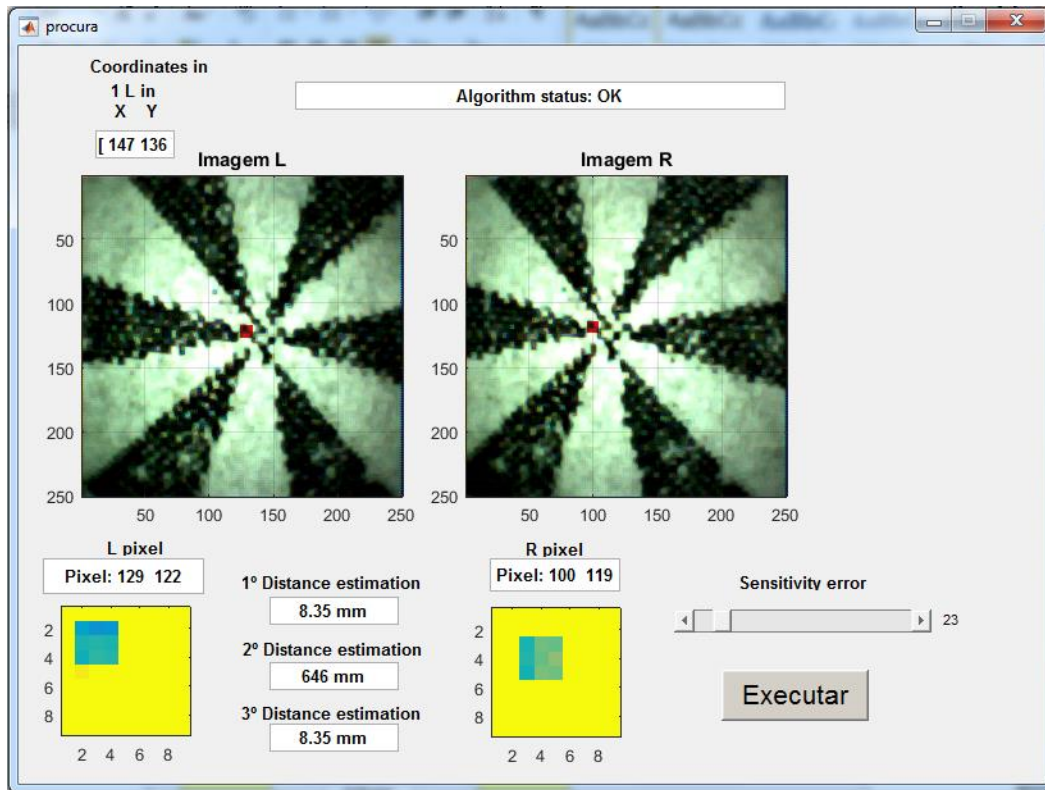


Figura 4.8 Plataforma contendo os pontos assinalados sobre o alvo na imagem.

Esta funcionalidade é importante porque permite ao utilizador verificar se existe correlação nos pontos assinalados sobre o alvo, relativamente aos encontrados.

#### 4.4 Implementação do *touch* com o rato

Dando continuidade ao trabalho, criou-se uma nova funcionalidade, de forma a tornar a plataforma mais interativa e funcional, com a implementação da função *touch* com o rato sobre a imagem. Esta função permitia selecionar o ponto sobre o alvo através do *touch* com o rato, sobre a imagem da esquerda, da mesma forma que se introduziam as coordenadas, como referido anteriormente.

#### 4.5 Limitação da área de pesquisa dos pontos sobre o alvo

A pesquisa era efetuada através de matrizes com o ponto sobre o alvo no seu centro, pelo que era necessário efetuar a limitação na área de pesquisa dos pontos sobre o alvo, criando uma região de interesse em ambas as imagem,

com uma diminuição dos limites da pesquisa de  $N/2$ , conforme representando na Figura 4.9, considerando que a matriz de pesquisa  $L_1$  é quadrada com dimensões  $N \times N$ .

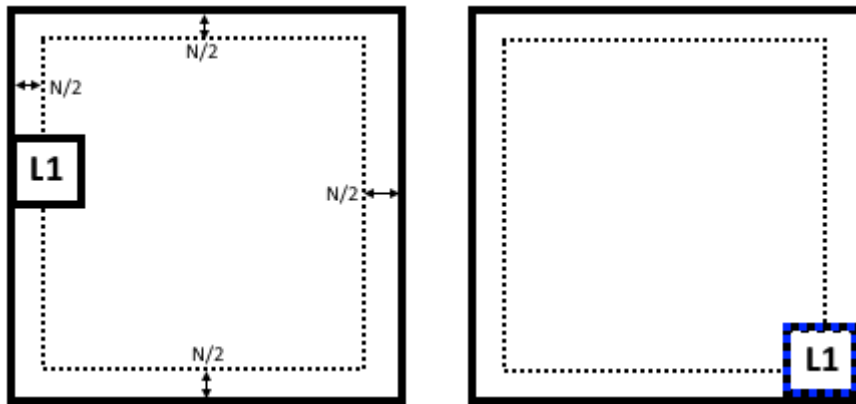


Figura 4.9 Limitação na pesquisa das imagens *stereo*.

Esta região irá depender do tamanho da matriz de pesquisa.

## 4.6 Calibração em distância

Após se efetuarem algumas medições a diferentes profundidades verificou-se que existia a necessidade de realizar calibrações nas funções que determinassem essas distâncias em profundidade, visto que os métodos de cálculo não têm em consideração a resolução entre o tamanho real do objeto e a sua representação na imagem, existindo assim a necessidade de realizar a calibração. Estas calibrações foram realizadas de forma empírica, tendo por base a medição realizada da profundidade entre a câmara e o ponto sobre o alvo, sendo posteriormente realizado o cálculo através do algoritmo, de forma a confirmar que o resultado correspondia ao valor medido. Uma vez que o valor do cálculo não correspondia ao valor medido, era necessário efetuar a correção no algoritmo, através da aplicação de um ganho de correção de profundidade, até que os valores medidos e calculados fossem iguais. Este processo foi repetido para diferentes valores de profundidade na gama de valores em que a câmara irá operar.

Para a medição da profundidade utilizou-se um paquímetro digital com margem de erro de  $50 \mu\text{m}$ , permitindo que os valores das medições fossem precisos.

De modo a facilitar a calibração do cálculo de distância foram acrescentados mais alguns parâmetros, temporariamente, no *user interface*, tais como a introdução manual do ponto sobre o alvo a ser pesquisado, o ganho para o ajuste do cálculo de profundidade (caso a pesquisa automática falhe), bem como a exportação de dados para um ficheiro com a extensão “.txt”, podendo posteriormente esse ficheiro auxiliar no manuseamento de dados fora da plataforma. Na Figura 4.10 encontra-se representada a plataforma utilizada

para as calibrações, nos cálculos das distâncias através de dois tipos de calibrações distintas.

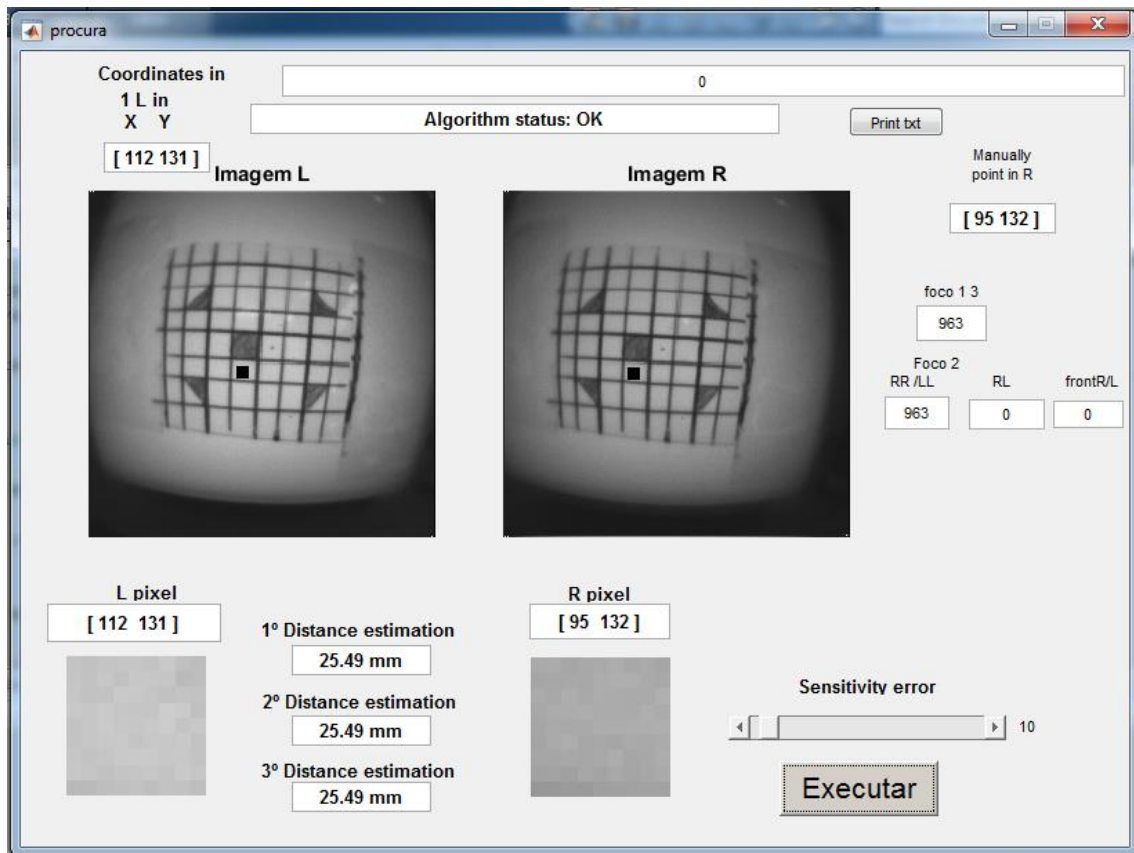


Figura 4.10 Plataforma para a calibração dos cálculos de distância.

A primeira calibração era realizada para os cálculos das profundidades pelos métodos um e três, por possuírem o mesmo tipo de calibração, e a segunda calibração era utilizada para o método de cálculo da profundidade dois.

#### 4.6.1 Calibração dos cálculos das profundidades pelos métodos um e três

A experiência consistiu em efetuar uma série de medições sobre um alvo plano a diversas profundidades entre a câmara e o alvo, e para cada profundidade selecionaram-se os pontos sobre o alvo mais centrais das imagens, tinham uma vez que têm menor níveis de distorção provocados pela lente.

As medições foram realizadas com base na equação (4.1),

$$\text{Profundidade} = \text{Função de cálculo de profundidade} \times \text{ganho de correção de profundidade} \quad (4.1)$$

A calibração foi efetuada variando o valor do ganho de correção de profundidade, até que o valor de profundidade correspondesse ao valor medido.

Segue-se um exemplo de como foi realizada a calibração para a profundidade de 10,62 mm para os métodos 1 e 3, na Figura 4.11.

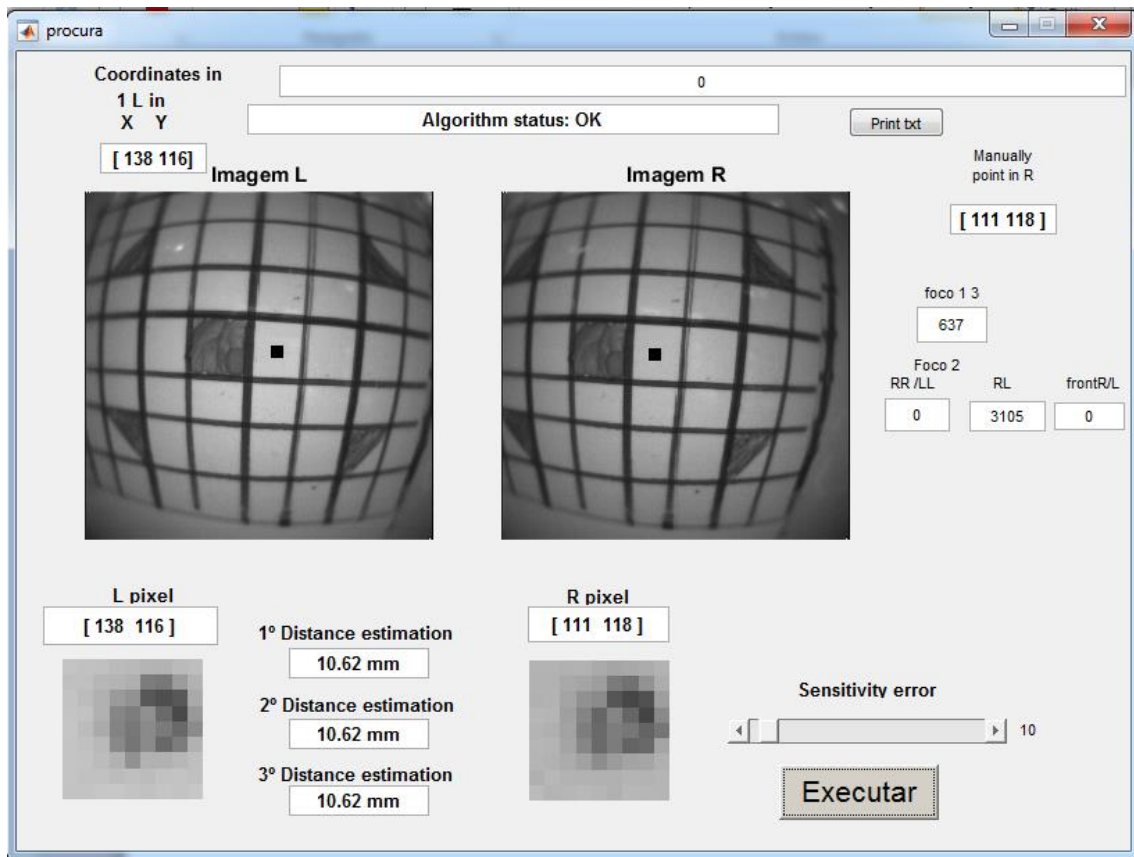


Figura 4.11 Calibração nos cálculos de profundidade de 10,62 mm.

Assim, à medida que se realizaram as calibrações foram registadas num ficheiro de dados.

Posteriormente estes dados foram exportados e trabalhados num ficheiro *Excel*. Tendo por base os resultados obtidos na experiência, selecionaram-se os dados dos cálculos de profundidade de um, que eram iguais aos cálculos de profundidade três, após a substituição dos parâmetros da câmara que serão abordados posteriormente, e do ganho de correção de profundidade representados na Figura 4.12,

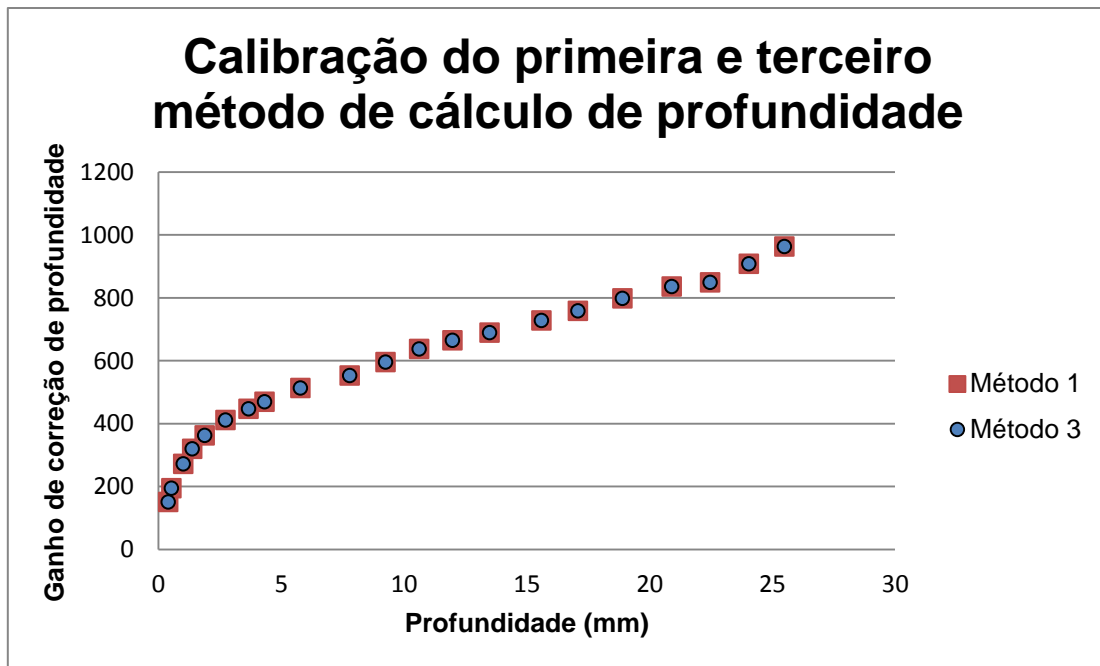


Figura 4.12 Gráfico com a relação do cálculo de profundidade com o ganho de correção de profundidade.

Verificando-se que este pode ser dividido em três partes, no eixo das abscissas, cujos os intervalos eram:

- A. Profundidade < 5 mm região não linear;
- B.  $5 \text{ mm} \leq \text{Profundidade} < 20 \text{ mm}$  região linear;
- C.  $20 \text{ mm} \leq \text{Profundidade}$  região não linear.

Nas regiões não lineares não será efetuada a calibração, visto que os pontos sobre o alvo utilizados para o cálculo se encontravam mais afastados do centro da imagem, sendo conseqüentemente afetados pela distorção provocada pela lente, conforme é possível verificar na Figura 4.13.

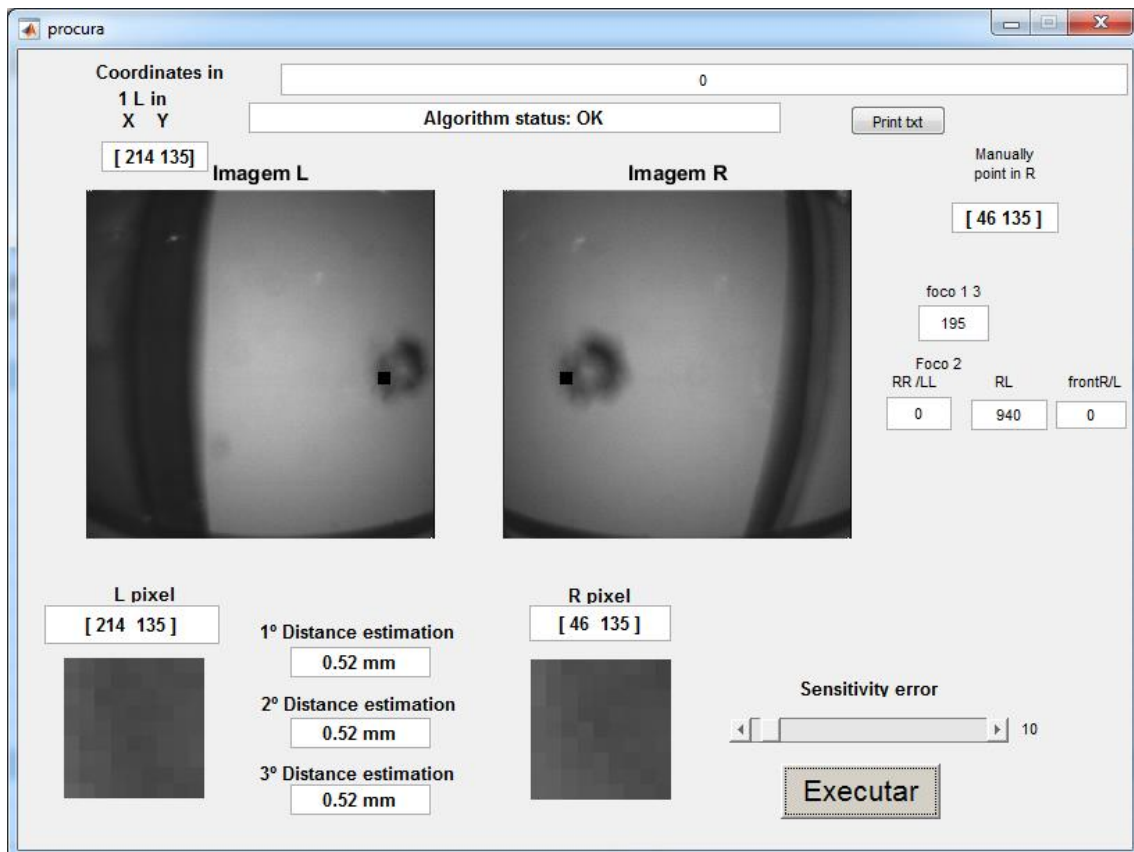


Figura 4.13 Calibração do cálculo de profundidade de 0,52 mm.

Neste exemplo, como a profundidade era pequena os dois pontos sobre o alvo localizavam-se fora do centro da imagem, sendo que a distorção provocada criava ligeiros desvios da posição correta e assim geravam não linearidade nos cálculos realizados.

A calibração foi efetuada apenas com os valores considerados lineares conforme referido anteriormente, dando origem ao gráfico presente na Figura 4.14.

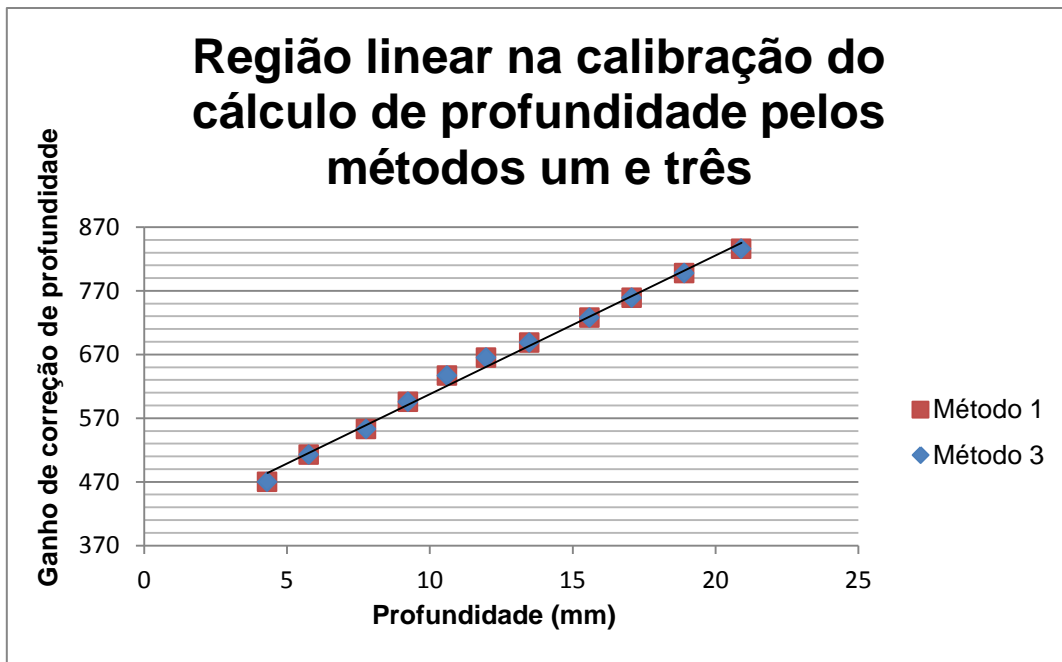


Figura 4.14 Gráfico com a região linear na calibração da profundidade.

Neste gráfico é possível observar que os valores podiam ser aproximados através de uma reta, no entanto, esta relação teve de ser manipulada matematicamente. Considerando a equação (4.1) foi mantido o valor do ganho de correção de profundidade no eixo das ordenadas e alterado o eixo das abcissas para o valor da função de cálculo sem calibração, conforme ilustrado na Figura 4.15.

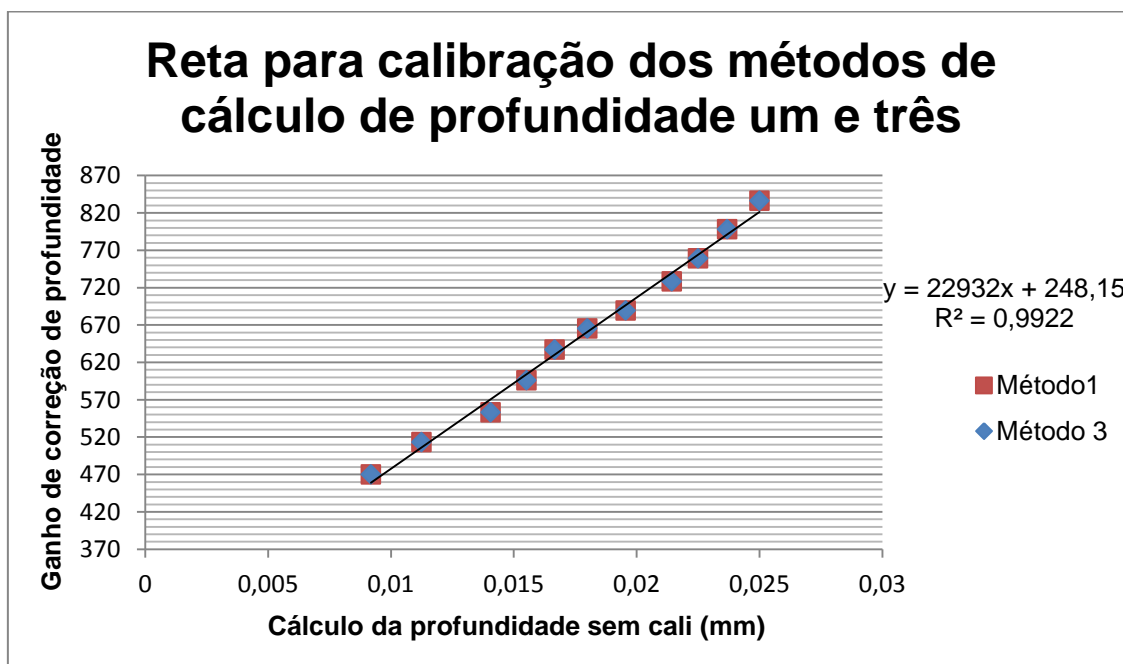


Figura 4.15 Gráfico com a reta para encontrar o ganho de correção do método cálculo das profundidades um e três.

Através da reta obtida pelo gráfico pôde ser aplicado no algoritmo, em que x corresponde à equação (2.19) no primeiro método de cálculo de profundidade ou à equação (2.44) no terceiro método de cálculo da profundidade, dando origem a y conforme a equação (4.2):

$$y = 22932 \times (\text{equação (2.19) ou (2.44)}) + 248 \quad (4.2)$$

que correspondia ao valor de ganho de correção de profundidade, sendo este valor posteriormente aplicado como um ganho na função de cálculo de profundidade conforme as equações,

$$D = \text{equação (2.19)} \times \text{equação (4.2)} \quad (4.3)$$

e

$$D = \text{equação (2.44)} \times \text{equação (4.2)} \quad (4.4)$$

Corrigindo deste modo os cálculos nas profundidades um e três.

Segue-se a Figura 4.16, que apresenta o gráfico com a comparação dos cálculos das profundidade antes e após calibração, no eixo das abscissas os valores das profundidades medidas e no eixos das ordenadas os cálculos das profundidades antes e após a calibração, para os valores dos métodos de cálculo um e três. Visto que estas equações são iguais, apenas serão apresentados os resultados dos cálculos para a primeira equação de profundidade.

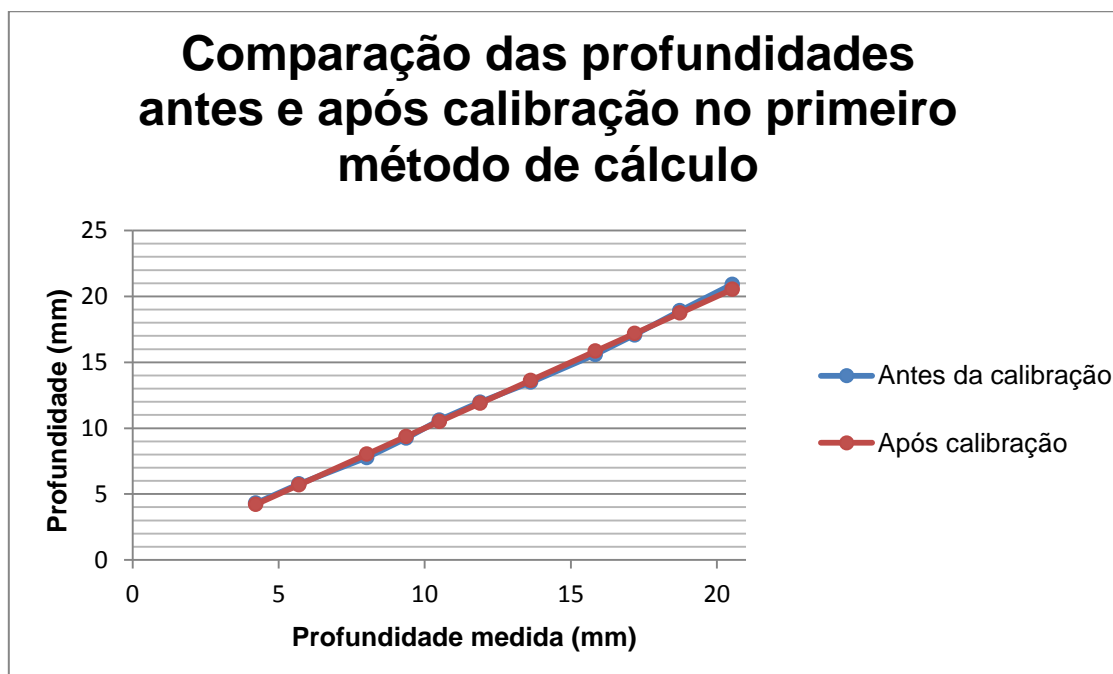


Figura 4.16 Comparação das profundidades antes e após a calibração nos cálculos de profundidades pelos métodos de cálculo um e três.

Efetuada uma análise ao gráfico, verifica-se que os valores de profundidades calculados conseguem obter resultados mais lineares e precisos relativamente aos valores calculados antes da calibração.

## 4.6.2 Calibração do cálculo da profundidade pelo método dois

De acordo com o que foi referido anteriormente, o segundo cálculo de profundidade era mais complexo, comparativamente à calibração nos cálculos das profundidades pelos métodos de cálculo um e três, visto que o cálculo dependia da localização dos *pontos* sobre as imagens *stereo*.

Quando os pontos sobre o alvo estavam localizados nos extremos da imagem sofriam distorção, pelo que não foi efetuada a calibração em todo o algoritmo, sendo realizada apenas para a função em que o ponto sobre o alvo se encontra localizado entre as câmaras, uma vez que estes apresentavam menos distorção.

Nesta calibração utilizaram-se os mesmos pontos sobre o mesmo alvo utilizados na calibração dos cálculos nas profundidades pelos métodos de cálculo um e três, bem como a mesma técnica para efetuar a calibração.

Foi criado o gráfico que apresenta a relação do ganho de correção de profundidade com o cálculo de profundidade, representado na Figura 4.17.



Figura 4.17 Gráfico com a relação ganho de correção de profundidade com a profundidade.

Este gráfico, comparativamente ao gráfico da Figura 4.12, apresenta algumas semelhanças, pois embora os valores do ganho de correção de profundidade sejam diferentes o comportamento é o mesmo. Observa-se ainda que existiam pontos sobre o alvo que não seguiam a tendência linear, pelo que podia ser dividido em três partes no eixo das abscissas, cujos intervalos eram:

- A. Profundidade < 1.9 mm região não linear;
- B.  $1.9 \text{ mm} \leq \text{Profundidade} < 22,43 \text{ mm}$  região linear;
- C.  $22,43 \text{ mm} \leq \text{Profundidade}$  região não linear.

Tal como nos cálculos de profundidades um e três, nas regiões não lineares, não foram efetuadas calibrações, sendo apenas utilizados os valores da região linear, obtendo-se a equação da reta para a calibração do algoritmo do cálculo de profundidade 2, sendo o eixo das ordenadas, representado pelo valor do ganho de correção de profundidade e no eixo das abcissas pelo valor da função do cálculo de profundidade, sem calibração, representado na Figura 4.18.

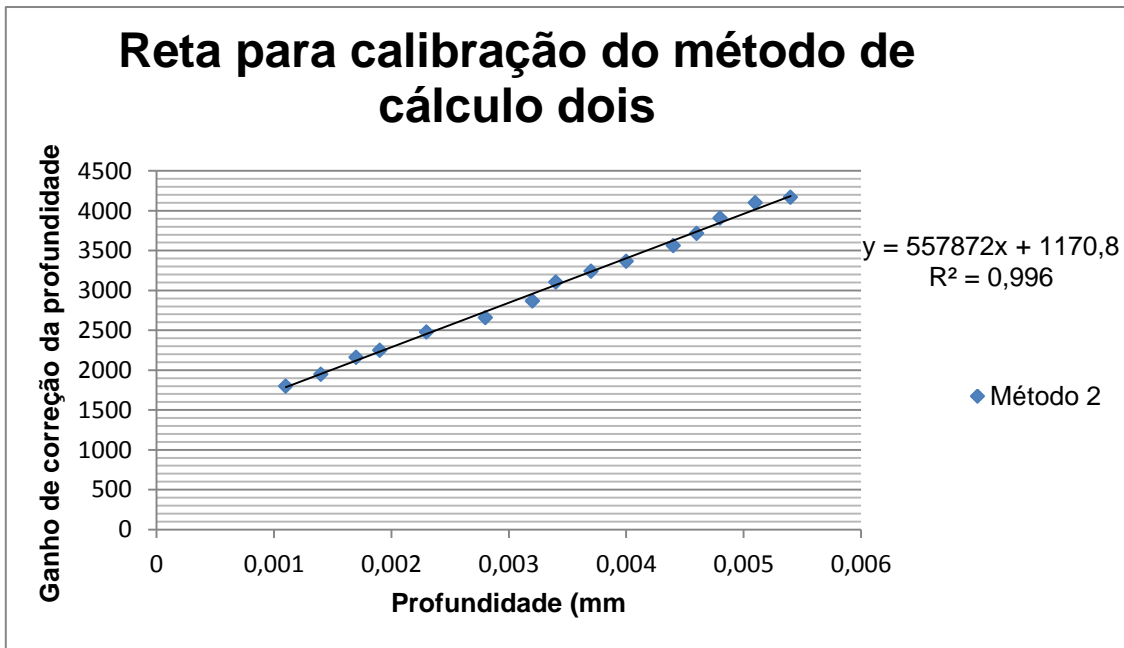


Figura 4.18 Gráfico com a reta para encontrar o *ganho de correção da profundidade dois*.

Obtém-se assim a equação da reta que foi utilizada para encontrar o valor do ganho de calibração, tal como se verificou no cálculo das profundidades um e três.

Verificou-se o comportamento da profundidade antes e após a calibração, através do gráfico representado na Figura 4.19, em que o traço a cor azul representa a profundidade obtida antes da calibração e o traço a cor vermelha após a calibração.

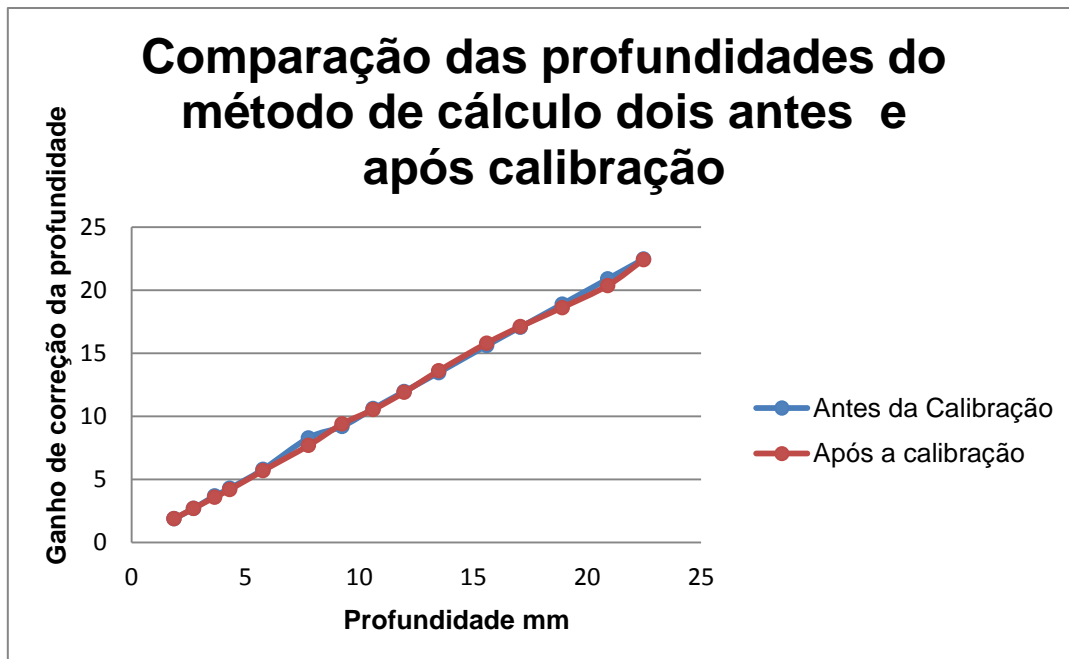


Figura 4.19 Comparação das profundidades antes e após calibração no método de cálculo de profundidade dois.

A profundidade obtida através da função de calibração apresenta melhores resultados comparativamente à profundidade obtida sem o ajuste do ganho da calibração de profundidade.

## 4.7 Escolha da equação do cálculo de profundidade

Na implementação do algoritmo terá de se optar por uma das três equações de cálculo da profundidade. Os fatores considerados para esta seleção foram a precisão do cálculo e a simplicidade da sua implementação, considerando que posteriormente este algoritmo seria integrado no projeto da *NanEye Stereo*.

Comparando as três formas de calcular a distância, verificou-se que após a calibração das equações de cálculo de profundidade estas apresentavam níveis de precisão idênticos, conforme os gráficos representados na Figura 4.20.

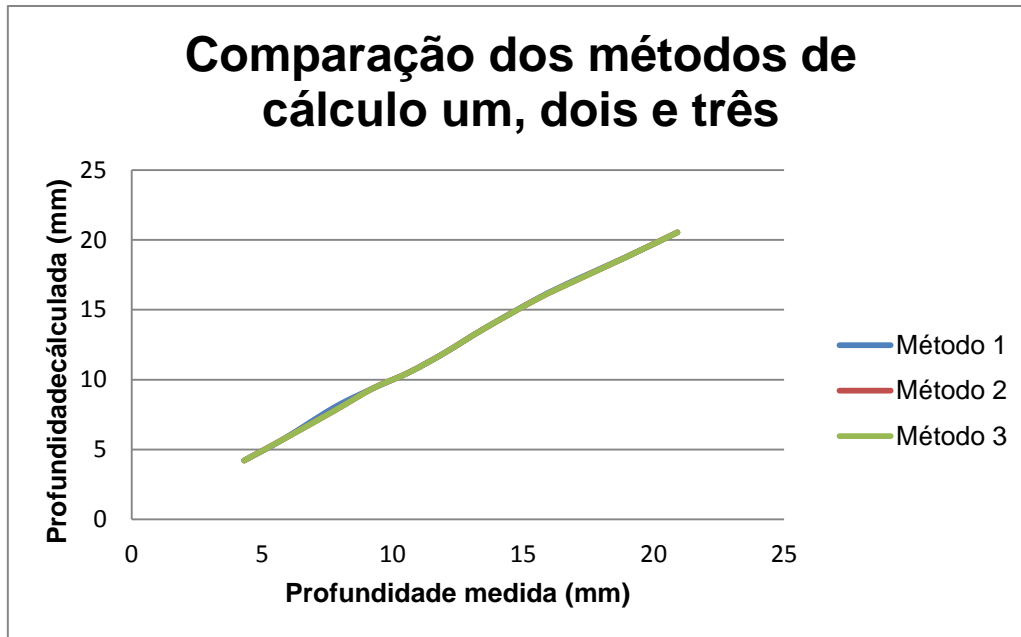


Figura 4.20 Gráfico de comparação das três equações de cálculo de profundidade.

No eixo das abscissas foram representados os valores das profundidades medidas para cada ponto sobre o alvo, e no eixo das ordenadas as profundidades calculadas.

De forma a efetuar a análise das equações de cálculo de profundidades, foram substituídos os valores dos parâmetros das câmaras, de modo a simplificar os cálculos.

Na equação (4.5) verifica-se o resultado da simplificação do método de cálculo um.

$$\text{Primerio método} = \frac{f \cdot X}{X_L - X_R} = \frac{0,375 \times 10^{-3} \cdot 1,2 \times 10^{-3}}{X_L - X_R} = \frac{0,45 \times 10^{-6}}{X_L - X_R} \quad (4.5)$$

No método de cálculo dois foi considerado, como exemplo, apenas o cálculo da profundidade quando o ponto sobre o alvo se encontrava entre as câmaras. Desta forma, tentando simplificar o método de cálculo dois verifica-se que:

$$\alpha_1 = \tan^{-1} \left( \frac{\left( \frac{x' - \frac{l}{2}}{\frac{l}{2}} \right) \cdot \tan \theta_1}{0,375 \times 10^{-3}} \right) = \tan^{-1} \left( \frac{(x' - 0,375 \times 10^{-3})}{0,375 \times 10^{-3}} \cdot 0,001 \right) \quad (4.6)$$

$$\alpha_2 = \tan^{-1} \left( \frac{\left( \frac{\frac{l}{2} - x''}{\frac{l}{2}} \right) \cdot \tan \theta_2}{0,375 \times 10^{-3}} \right) = \tan^{-1} \left( \frac{(0,375 \times 10^{-3} - x'')}{0,375 \times 10^{-3}} \cdot 0,001 \right) \quad (4.7)$$

$$\text{Segundo método} = \frac{\tan\left(\frac{\pi}{2} - \alpha_1\right) \cdot \tan\left(\frac{\pi}{2} - \alpha_2\right) \cdot X}{\tan\left(\frac{\pi}{2} - \alpha_1\right) + \tan\left(\frac{\pi}{2} - \alpha_2\right)} \quad (4.8)$$

Neste caso o método de cálculo dois não pôde ser mais simplificada porque depende de  $\alpha_1$  e  $\alpha_2$ , sendo esses os ângulos, em que os cálculos dependem do ponto sobre o alvo.

Relativamente ao método de cálculo três, pôde ser simplificada, apresentando-se em seguida:

$$\begin{aligned} \text{Terceiro método} &= \frac{l \cdot X}{2 \tan(\theta) (X_L - X_R)} = \frac{1,2 \times 10^{-3} \cdot 250,3 \times 10^{-6}}{2 \times \tan(45) \times (X_L - X_R)} \quad (4.9) \\ &= \frac{0,45 \times 10^{-6}}{(X_L - X_R)} \end{aligned}$$

Verifica-se que o resultado das equações de cálculo um e três, representadas nas equações (4.5) e (4.9), é igual, pelo que os valores na calibração correspondem ao mesmo resultado.

Quanto ao método de cálculo dois, o seu valor depende de cálculos que envolvem trigonometria o que dificulta uma posterior implementação numa FPGA, bem como a eficiência do algoritmo, o que poderia por em causa a eficiência do projeto na NanEye Stereo, onde seria inserido.

Quanto à complexidade do método de cálculo, a escolha recai sobre as equações de cálculo um e três, visto que após a introdução dos parâmetros da câmara as equações das profundidades são iguais resultando em,

$$D = \frac{0,45 \times 10^{-6}}{(X_L - X_R)} \quad (4.10)$$

Para o método de cálculo dois é necessário realizar cálculos de trigonometria, aumentando assim a sua complexidade, pelo que foi excluída neste projeto.

## 4.8 Comportamento do cálculo de profundidade

Após a calibração obteve-se o método de cálculo de profundidade, de forma a verificar o comportamento da função e criou-se o gráfico representado na Figura 4.21, em que o eixo das abcissas corresponde à diferença  $X_L - X_R$ , variando entre 1 a 250 *pixéis* e o eixo das ordenadas ao resultado da profundidade com base no valor do eixo das abcissas.

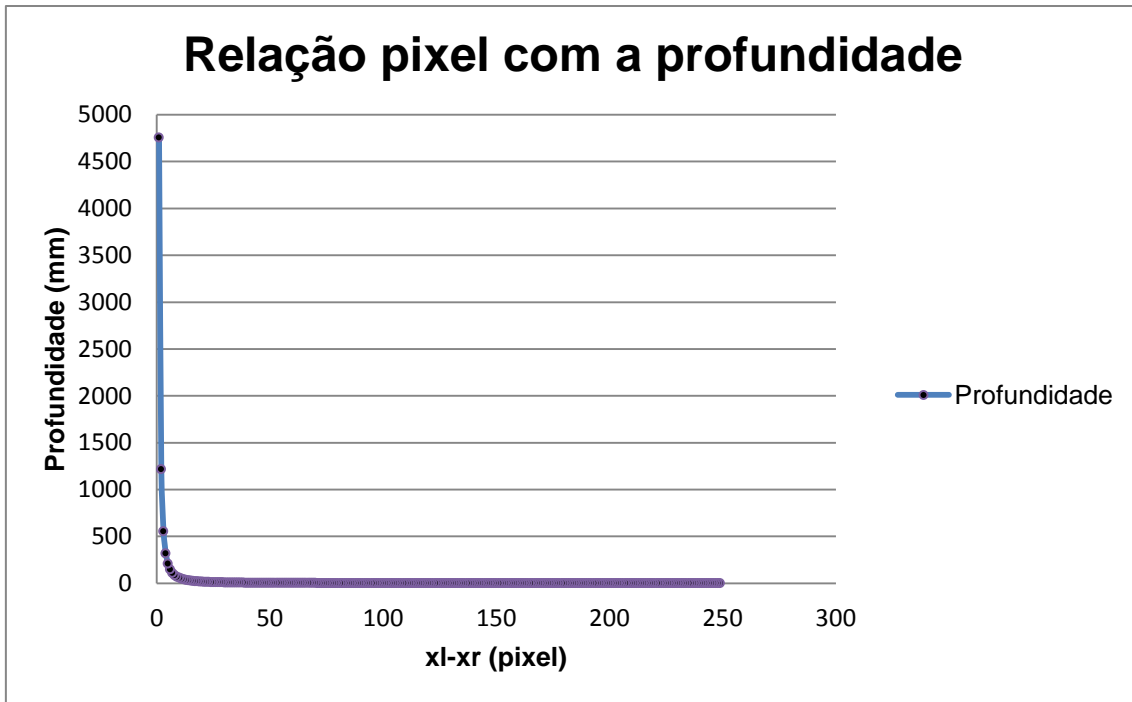


Figura 4.21 Relação *pixel* com a profundidade.

Analisando o gráfico, verifica-se que o cálculo não é realizado de forma linear considerando a variação da profundidade de *pixel* para *pixel*, verificando-se que a escala aumenta com a profundidade.

Na prática isto implica a limitação na escala da relação *pixel*/profundidade a uma gama de valores, visto que para profundidades superiores a 31 mm a variação de um *pixel* pode corresponder a uma escala superior a 3,5 mm, correspondendo a uma variação elevada relativamente a pretendida neste trabalho. No entanto a câmara irá operar num ambiente com profundidades menores. Quanto à limitação para distâncias menores existe o problema de o ponto sobre o alvo não estar representado nas duas imagens, sendo que para os cálculos esta opção não é válida. Assim sendo, a limitação da escala será realizada entre a profundidade de 1mm a 31mm, verificando-se o resultado representado na Figura 4.22.

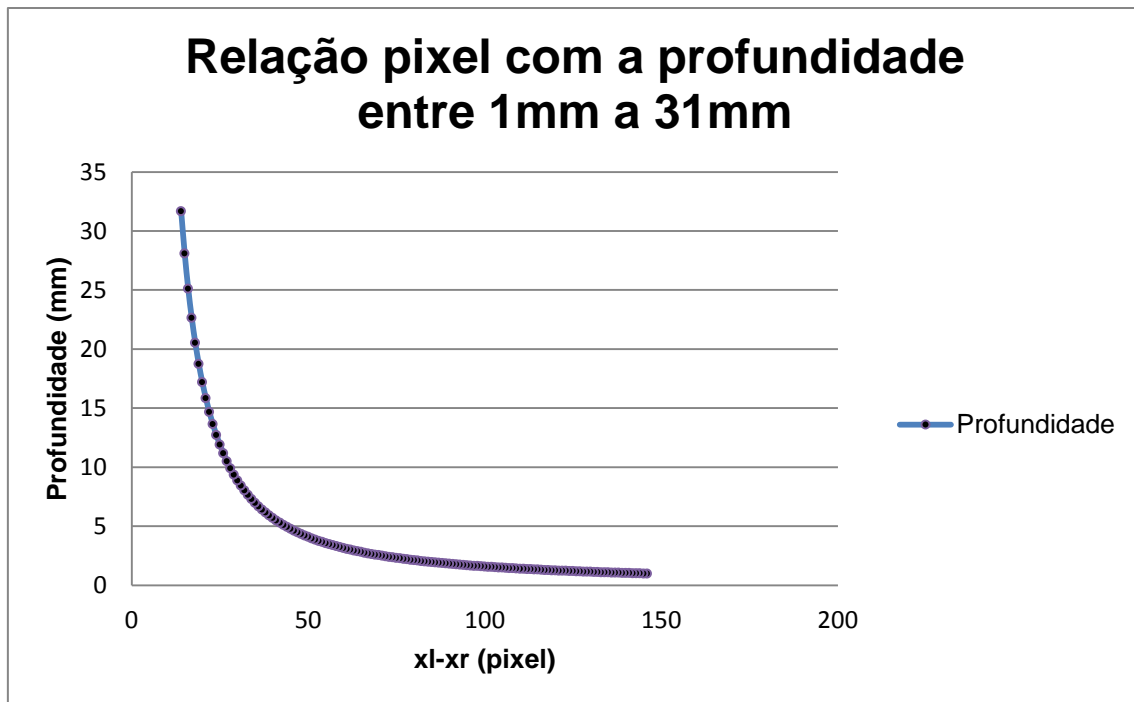


Figura 4.22 Relação *pixel* com a profundidade, limitando à profundidade entre 1 a 31mm.

Apesar de ser efetuada esta limitação na escala, a partir da profundidade de 20mm a escala diminui a precisão. No entanto, esta gama de valores não é muito utilizada nas condições de operação da câmara dentro do corpo humano, por exemplo nas endoscopias.

## 4.9 Conclusões

Conclui-se nesta secção que foi possível criar um algoritmo capaz de calcular a profundidade, tendo por base as coordenadas de um determinado ponto sobre o alvo sobre as imagens *stereo*.

Relativamente às coordenadas utilizadas para o cálculo da profundidade estas eram obtidas da seguinte forma: a primeira era indicada numa das imagens, optando-se pela imagem *stereo* da esquerda, e a segunda coordenada era é pesquisada na outra imagem.

O cálculo da profundidade dependia do sucesso da correlação do ponto sobre o alvo sobre as imagens *stereo*, ou seja, dependia das coordenadas encontradas em cada imagem pertencentes ao ponto sobre o alvo.

Durante a calibração do cálculo da profundidade, verificou-se que pontualmente, em algumas profundidades, as correlações dos pontos sobre os alvos não se encontravam corretas, sendo necessário introduzir as coordenadas, manualmente.

Verificou-se durante o estudo [22], na referência em que se obteve o primeiro método de cálculo de profundidade, que o método selecionado para a

correlação dos pontos sobre as imagens *stereo* ocorreu através da cor, e dada a complexidade e falhas por ambiguidade o autor realizou as medições através da introdução manual dos pontos. Deste modo, foi possível demonstrar a complexidade da correlação de pontos sobre as imagens *stereo*, tendo em conta os altos níveis de ambiguidade na correlação.



## 5. Processamento de imagens digitais

Tendo por base o trabalho desenvolvido no capítulo anterior, foram criados diferentes sistemas com vista a melhorar a qualidade da imagem e consequentemente melhorar a correlação dos pontos sobre os alvos nas duas imagens *stereo*.

### 5.1 Aplicação de *offset* na matriz RGB do sensor CMOS

O sensor NanEye contém uma matriz de Bayer, representada na Figura 5.1, cujo padrão de filtro de cores é vermelho, verde e azul. No sentido de maximizar a velocidade de processamento, as imagens são analisadas em tons de cinza. Verificou-se que a presença do filtro de cor com o padrão de Bayer [9] influenciava a responsividade e sensibilidade de cada um dos pixéis, uma vez que cada *pixel* é afetado por um dos filtros RGB [9] presentes na matriz.

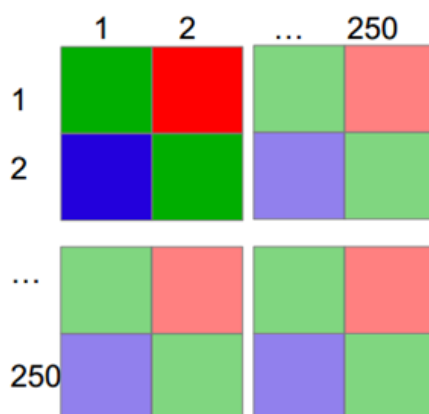


Figura 5.1 Matriz de *Bayer* do sensor NanEye [10].

De forma a verificar o efeito de cada filtro de cor na matriz de Bayer no sensor NanEye, consideraram-se duas amostras de cor uniforme branca com baixa luminosidade, com 5x5 *pixéis*, conforme representado na Figura 5.2.

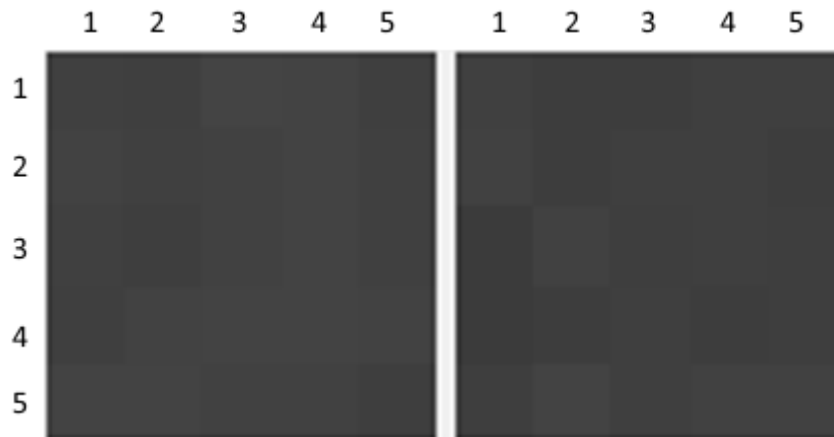
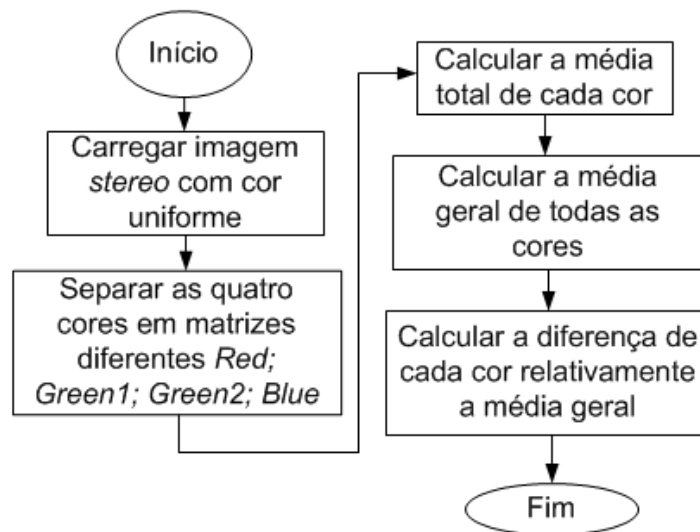


Figura 5.2 Duas amostras de 5x5 *pixéis*.

Note-se que dois *pixéis* adjacentes apresentam sempre ligeiras diferenças nas cores.

Considerando um ponto sobre o alvo, representado nas duas imagens *stereo*, verifica-se que a influência do filtro de Bayer irá provocar diferentes níveis de representação para o mesmo ponto sobre o alvo, pelo que a sensibilidade na captação de cor deve ser corrigida.

Deste modo, para corrigir estas ligeiras diferenças nas cores foi efetuado um estudo para verificar qual o *offset* a aplicar e a cada filtro de cor. Criou-se assim um algoritmo que permitiu encontrar as diferenças na captação de cor, conforme explicado através do Fluxograma 5.1. De realçar que se distinguiram dois filtros *Greens*, o filtro *Green<sub>1</sub>* que se encontra na linha do filtro *Red* e o filtro *Green<sub>2</sub>* que se encontra na linha do filtro *Blue*, conforme representado na Figura 5.1.



Fluxograma 5.1 Algoritmo para encontrar as diferenças na sensibilidade de captura de cor RGB.

Realizou-se um estudo com 5 imagens *stereo* para uma cor uniforme e com diferentes níveis de luminosidade, separaram-se todas as cores conforme o padrão de Bayer e posteriormente calculou-se a média para cada filtro de cor de forma independente. Posteriormente calculou-se a média total, conforme apresentado na Tabela 2.

Tabela 2 Valores médios por filtro de cor.

Média	Média sensor (DN)	Offset (DN)
G <sub>1</sub>	396	-2
R	393	1
B	395	-1
G <sub>2</sub>	393	1
Total	394	

O valor de correção do *offset* a aplicar em cada filtro de cor corresponde à diferença entre a média de todos os pixels e a média dos pixels por filtro de cor. Na Figura 5.3 encontram-se representadas as imagens *stereo* capturadas, a imagem R e a imagem L, com e sem a aplicação do algoritmo, respetivamente.

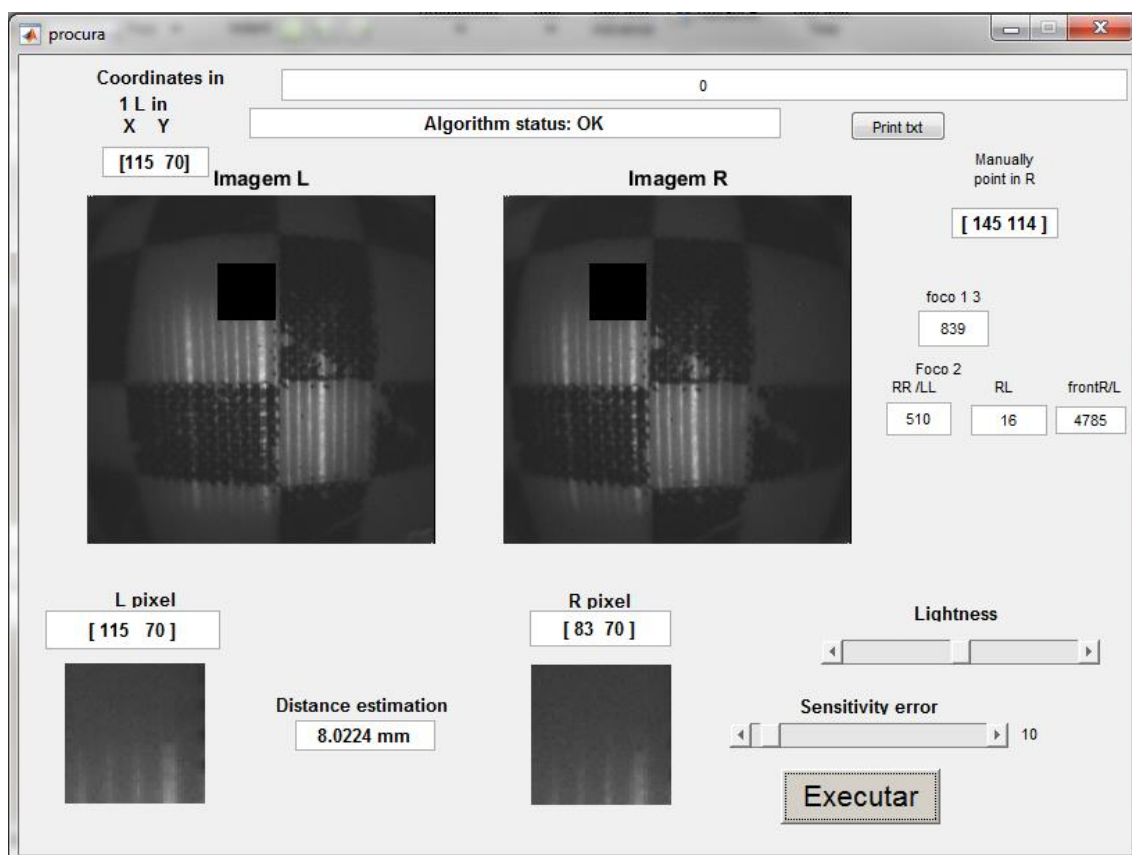


Figura 5.3 Comparação da aplicação de *offset*.

Verifica-se que a aplicação do *offset* não é muito perceptível, visto que a variação em valores de DN é pequena.

De referir que as medições acima descritas foram efetuadas num alvo plano, em frente à câmara com a profundidade de 8,17 mm, sendo considerados seis pontos sobre o alvo, conforme representado na Figura 5.4.

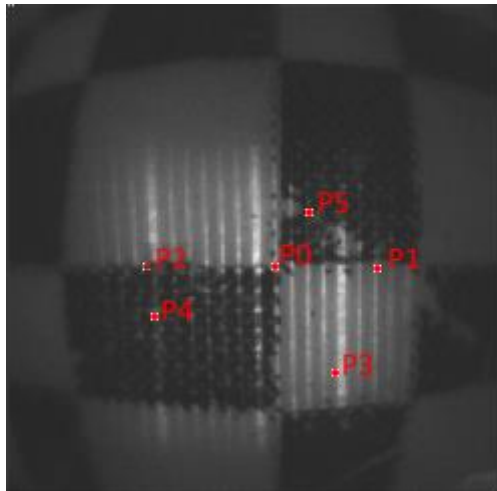


Figura 5.4 Localização dos seis pontos sobre o alvo.

Foi verificada a sincronização em cada ponto sobre o alvo sobre as imagens *stereo*, sendo que o cálculo da profundidade dependia dessa sincronização. Deste modo, podem ser comparadas as profundidades, antes e após a correção do *offset*, provocado pelos filtros de cor de Bayer, em cada ponto sobre o alvo.

Após terem sido efetuados os diversos cálculos para as profundidades, criaram-se os gráficos com a comparação entre o antes e após aplicação deste algoritmo, representado na Figura 5.5.

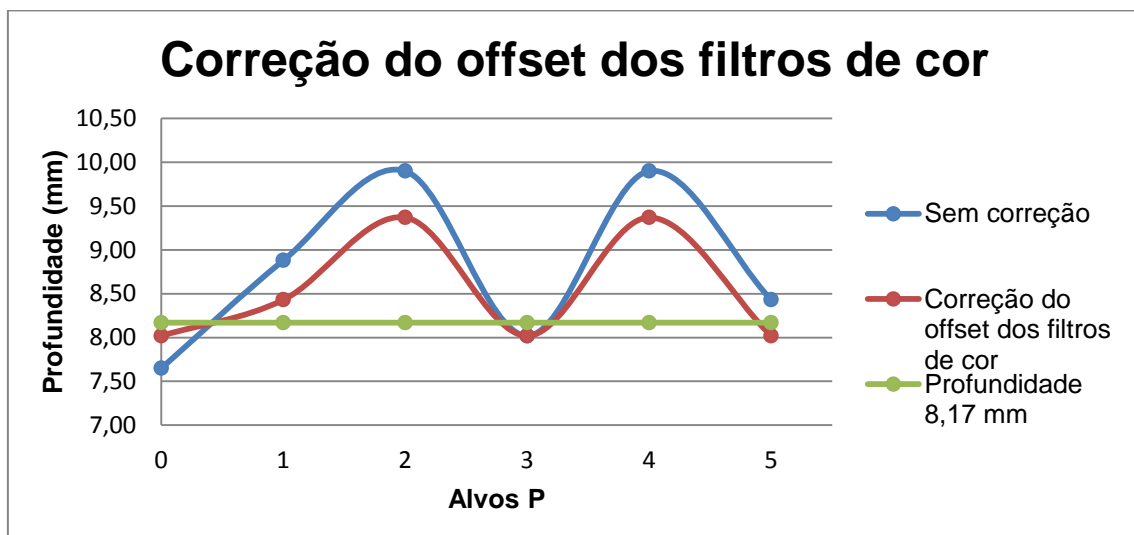


Figura 5.5 Gráfico com a comparação com e sem a aplicação do algoritmo de *offset*.

Verifica-se que ambas as funções têm o mesmo comportamento, no entanto, com a aplicação do *offset* os valores estimados são mais precisos relativamente aos valores sem a aplicação da correção.

De modo a quantificar os resultados obtidos após aplicação deste algoritmo, verificou-se o erro em percentagem em relação ao valor medido para a profundidade de 8,17 mm, representado na Figura 5.6.

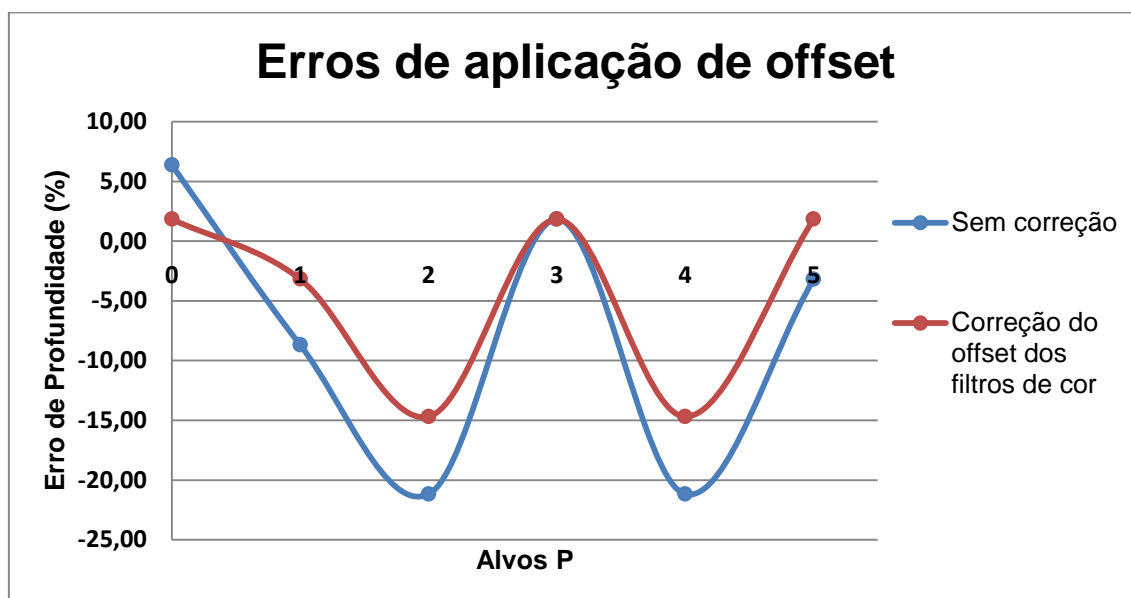


Figura 5.6 Gráficos com a comparação da aplicação do *offset* RGB.

Sem a aplicação do algoritmo o erro máximo é de aproximadamente -20 % e após a correção o erro diminui para aproximadamente -15 %.

## 5.2 Aumento do contraste

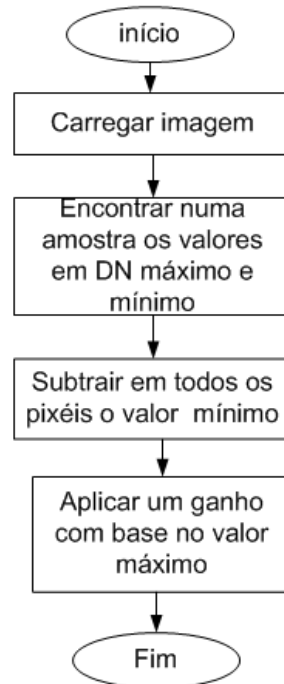
Habitualmente, verifica-se que a maioria das imagens concentra tons de cor em determinadas tonalidades, ou seja, numa determinada gama de valores em DN, normalmente denominada de gama dinâmica. Se a gama dinâmica for por exemplo, apenas 50%, a deteção do ponto sobre o alvo estará limitada e mais sujeita a erros, uma vez que uma variação de contraste de 50% é mais pequena comparativamente à variação em toda a escala de representação possível. No caso do sistema *NanEye Stereo*, a resolução por *pixel* é de 10 bits variando de 0 a 1023 valores digitais ou DN. No sentido de melhorar a gama dinâmica, desenvolveu-se um algoritmo que a aumente e, por conseguinte, aumente o contraste, com o objetivo de aumentar a diferença no padrão de toda a imagem, tornando o algoritmo mais robusto.

O algoritmo implementado, pesquisava o valor máximo e mínimo em valores de DN presentes na imagem, e após isso, era aplicado um *offset* em toda a imagem, de forma a que o valor mais baixo da função fosse igual ao valor mais baixo da escala (0 DN). Posteriormente, era aplicado um ganho de modo a que

o valor máximo da função aumentasse até ao valor máximo de escala de 10 bits, correspondendo ao valor de 1023 DN.

De modo a facilitar a pesquisa do valor máximo e mínimo de toda a imagem, considerou-se a linha 125 no centro da imagem da esquerda como amostra de referência, visto que é a linha na imagem com menos distorção.

Criou-se assim o algoritmo representado no Fluxograma 5.2, onde é explicado como foi criado o código.



Fluxograma 5.2 Aumento do contraste.

Tendo por base o mesmo alvo nas mesmas condições utilizadas anteriormente, será demonstrado como se procedeu ao aumento de contraste, com um exemplo para a distância de 8,17 mm. Segue-se a Figura 5.7, com a amostra da linha 125, com o traço a cor azul, onde foram encontrados os valores máximos e mínimos como valores de referência para o aumento do contraste nas duas imagens *stereo*.

Nesta amostra foram obtidos o valor máximo de 750 DN e o valor mínimo de 150 DN. Neste caso, o *offset* a aplicar foi de -150 DN e o ganho calculado a partir do valor máximo, que após o *offset* correspondia a 600 DN. O ganho a ser aplicado foi obtido a partir da equação (5.1):

$$\text{Ganho} = \frac{10 \text{ bits}}{\text{Valor Máximo}} = \frac{1024}{600} = 1,7 \quad (5.1)$$

Neste caso em particular o ganho a aplicar a todos os *pixéis* da imagem era de 1,7. Se existisse algum valor acima de 1023, o valor era assumido como sendo

1023 DN, tal como quando era aplicado o *offset*, se existissem valores abaixo de 0 DN esses valores passavam a ser considerados 0 DN.

O resultado após a aplicação do algoritmo encontra-se representado com o traço a cor vermelha na Figura 5.7.

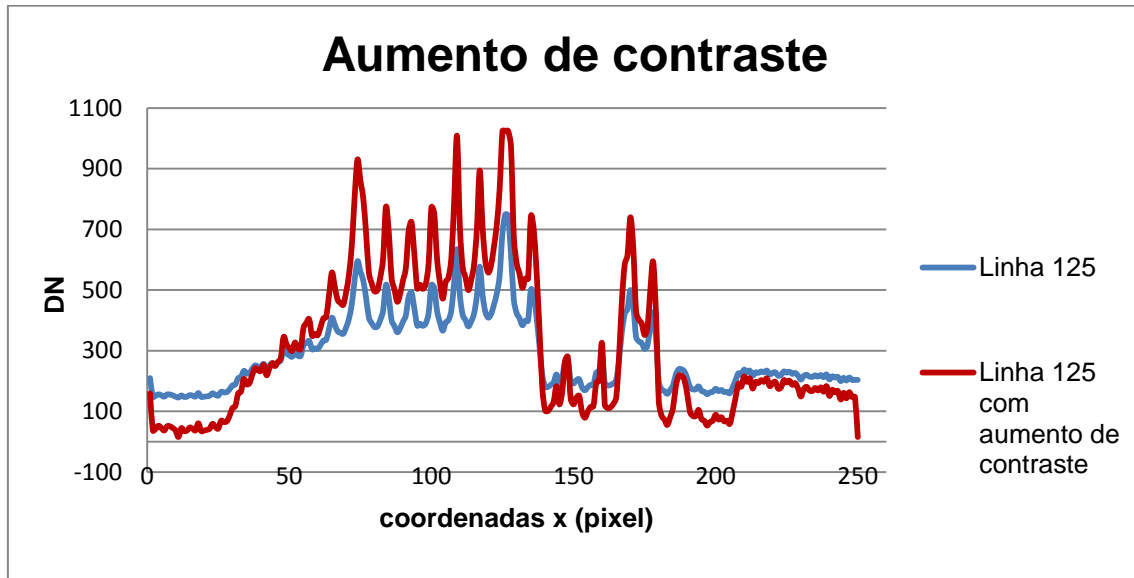


Figura 5.7 Gráfico com a amostra da linha 125 após aplicação do algoritmo.

Verifica-se que os valores máximos e mínimos foram estendidos de forma a aproveitar toda a escala de 10 bits.

De modo a comparar a diferença entre a aplicação ou não do algoritmo de aumento de contraste, na Figura 5.8 encontra-se representada a imagem da direita e da esquerda com e sem a aplicação do algoritmo, respetivamente.

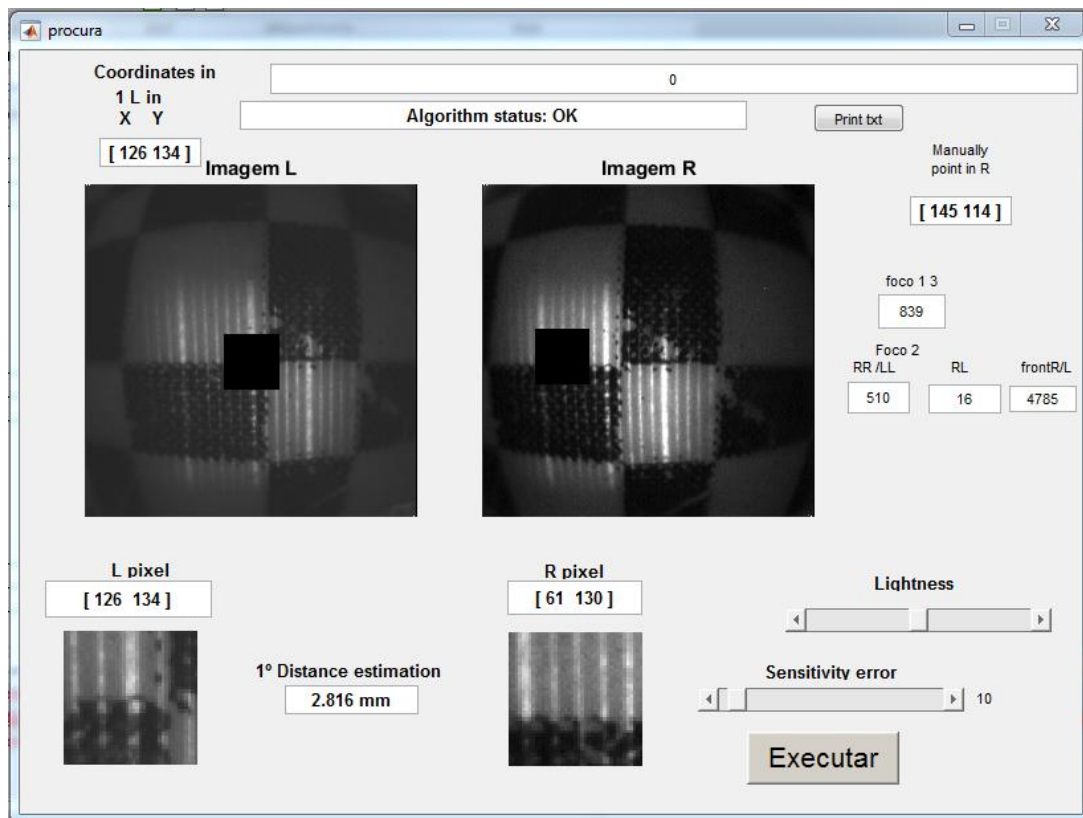


Figura 5.8 Imagem com a comparação sem e com a aplicação do algoritmo de aumento de contraste.

Verificou-se que com a aplicação do algoritmo as cores ficaram mais salientes, pelo que as cores claras ficaram mais claras e as escuras mais escuras, melhorando assim o contraste de cor na imagem.

Na Figura 5.9 encontra-se representado o gráfico com o método de cálculo de profundidade, nos mesmos pontos utilizados anteriormente sobre o alvo, representados na Figura 5.4, em que é realizada a comparação da profundidade sem a correção indicada com um traço de cor azul, da correção do *offset* dos filtros de cor Bayer indicada com um traço de cor vermelho, da correção do aumento de contraste com um traço a cor verde e com um traço de cor preta a profundidade de 8,17mm.

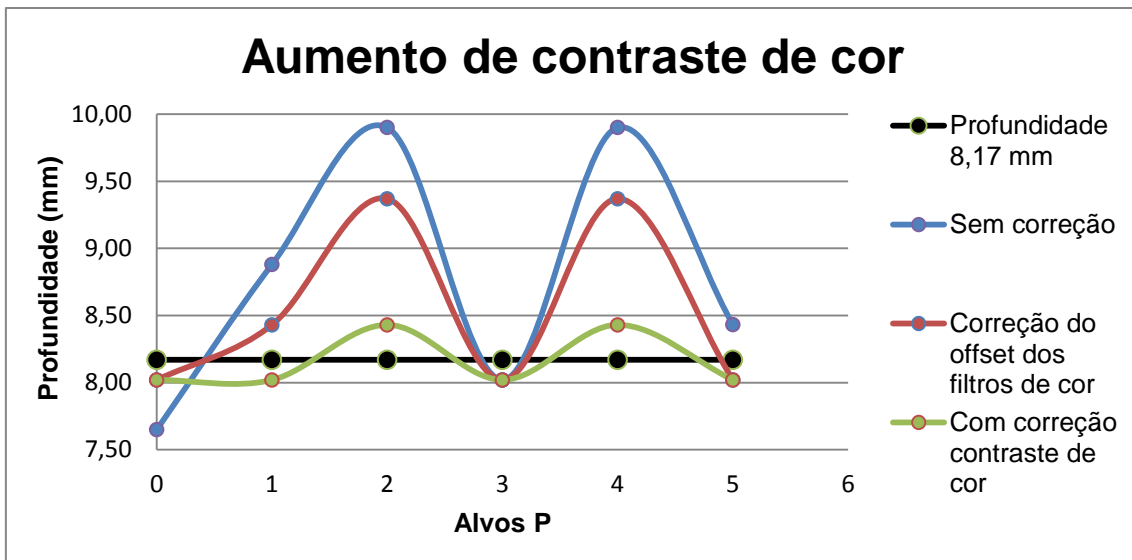


Figura 5.9 Comparação do cálculo de profundidade com e sem aplicação de algoritmos.

De forma a verificar os erros de profundidade resultantes da aplicação dos algoritmos, criou-se o gráfico com a representação dos erros e a comparação dos erros das medições das profundidades sem correção, representado com um traço de cor azul, com correção, do *offset* dos filtros de cor representado com um traço a cor vermelho e com aumento de contraste com um traço a cor verde.

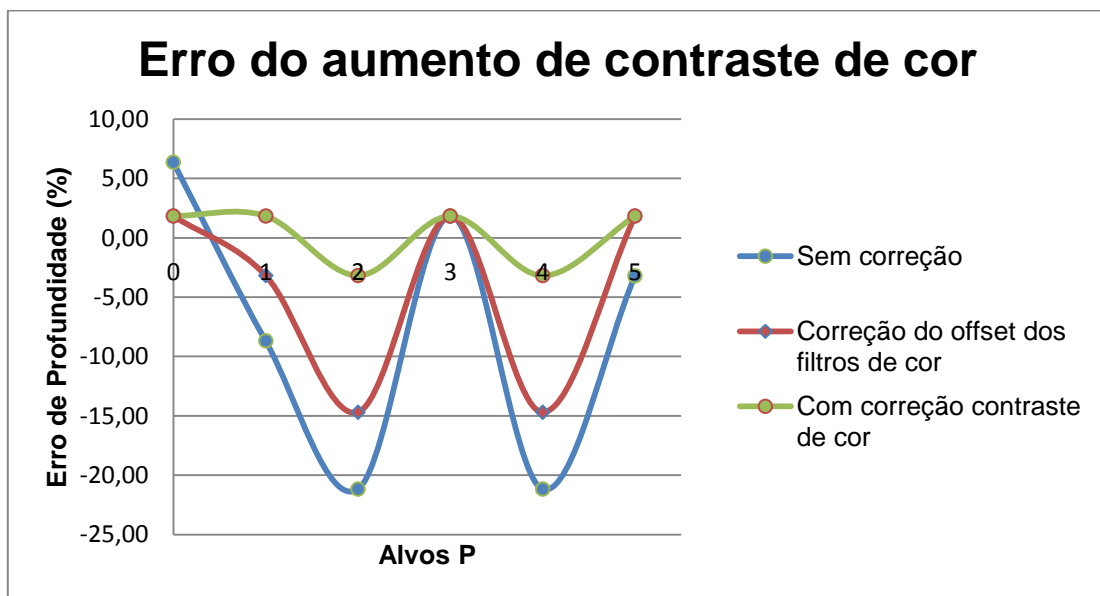


Figura 5.10 Gráficos a comparar a aplicação dos algoritmos.

Com a aplicação dos algoritmos de correção nas imagens, os erros nos cálculos das profundidades são menores, no entanto, estes podem variar dependendo de vários fatores, tais como: qualidade da imagem, localização do ponto sobre o alvo na imagem (associada à distorção) e diferenciação do padrão envolvente ao ponto sobre o alvo relativamente a toda a imagem.

Após a aplicação do algoritmo, a sincronização dos pontos sobre o alvo fica mais estável e consequentemente os valores de erro são mais baixos, sendo aproximadamente, 3%. Para a distância de 8,17 mm o erro foi de 0,16 mm no método de cálculo da profundidade.

### **5.3 Cálculo da profundidade considerando a média temporal**

O sistema NanEye *Stereo* opera em modo de vídeo, com uma taxa de transmissão nominal de 44 imagens por segundo. Tal como em todos os sensores de imagem, existe ruído temporal que influencia os níveis de contraste da imagem visto que este ruído é estocástico. Uma vez que o sistema NanEye *Stereo* é composto por dois sensores e este ruído é diferente de sensor para sensor, torna-se um desafio obter resultados fiáveis apenas com uma imagem por sensor [28].

Assim sendo, foi realizado um estudo de forma a que os cálculos das profundidades fossem sejam efetuados com base na média de uma sequência de *frames*. Foi também estudada a quantidade de *frames* necessários para uma correta equação de cálculo de profundidade, bem como de que modo era realizado este procedimento.

Nesta nova experiência optou-se por alterar o alvo de modo a comprovar que para determinados pontos sobre alguns alvos a deteção é mais complexa, não sendo fiável realizar medições de profundidade com apenas uma medição, implicando a realização de diversas medições para o mesmo ponto sobre o alvo conforme será demonstrado.

Considerando uma amostra de 100 imagens *stereo* seguidas, foram selecionados cinco pontos sobre o alvo, fixos nas 100 imagens *stereo*, considerando um alvo fixo à distância de 7,3mm. Neste caso, para cada ponto sobre o alvo foi efetuada a média das equações de cálculo da profundidade para as 100 imagens, sendo os resultados apresentados no gráfico da Figura 5.11. No eixo das ordenadas encontram-se os valores das médias das profundidades e no eixo das abcissas os cinco pontos sobre o alvo.

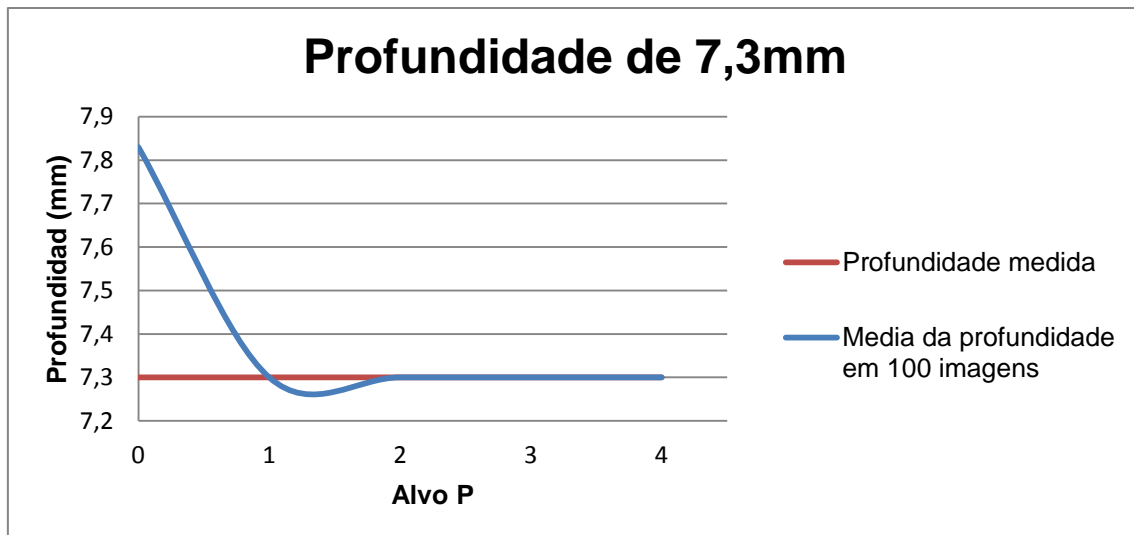


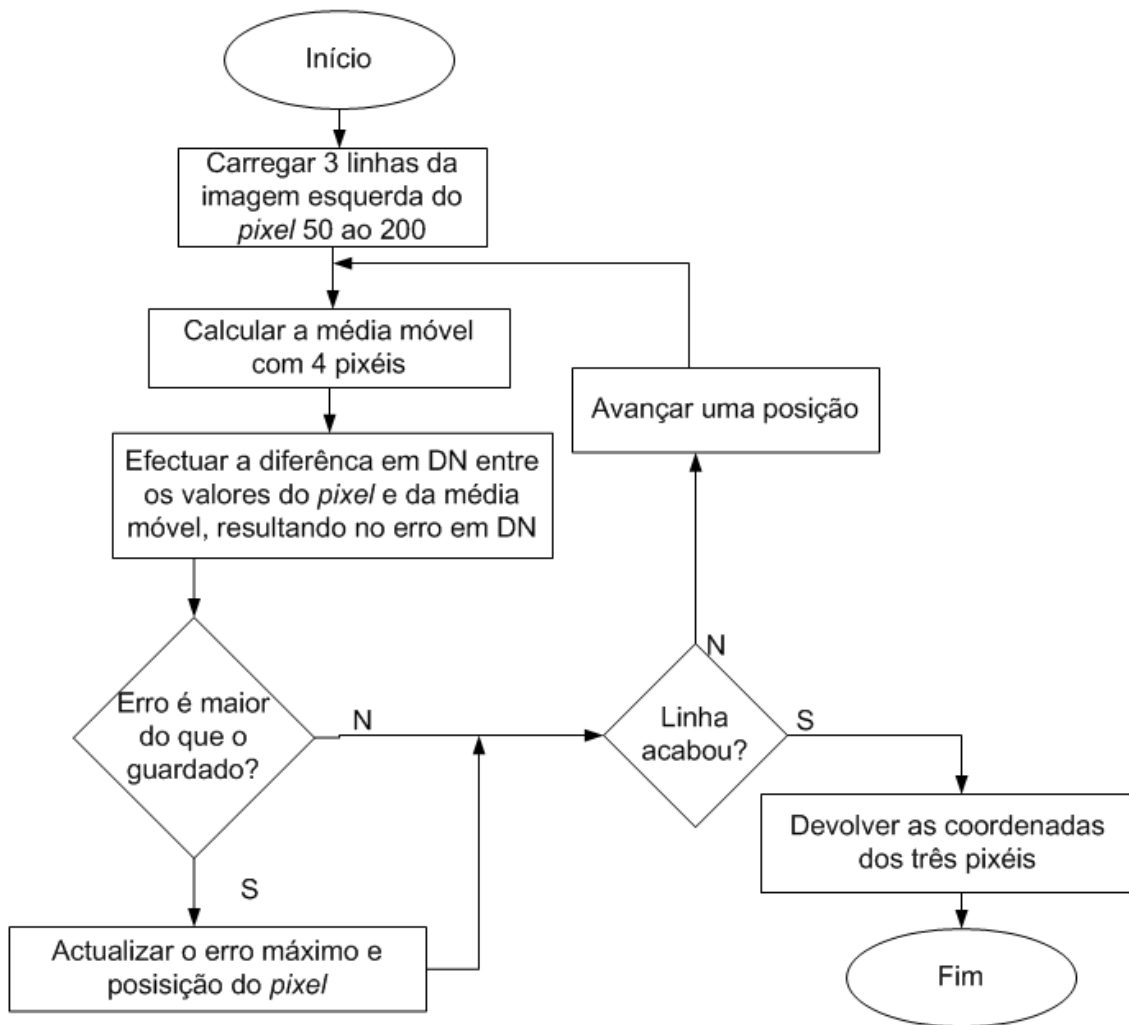
Figura 5.11 Gráfico com o método de cálculo de profundidade de cinco pontos sobre o alvo com média de 100 imagens.

À exceção do primeiro ponto sobre o alvo, todos os restantes foram calculados corretamente, tendo em conta o cálculo da média da profundidade, permitindo obter resultados bastante precisos.

Quanto ao facto de nem todos os valores terem sido medidos individualmente de forma correta, este está relacionado com o facto de o padrão envolvente ao ponto sobre o alvo não se destacar sobre a imagem, existindo ambiguidades na sincronização dos pontos sobre o alvo. Outra relação que se pode retirar, está relacionada com o tempo de cálculo das 500 profundidades, que demorou um tempo aproximado de 3,3 minutos, não sendo por isso prático calcular as profundidades através deste método.

De forma a melhorar o sistema implementou-se uma solução, em que os pontos sobre o alvo foram escolhidos sobre a imagem *stereo* da esquerda de forma dinâmica. Definiu-se três linhas e em cada linha foi selecionado um ponto na região com maior nível de contraste. Para ajudar na deteção das coordenadas com maior variação de contraste foi introduzido um projetor de linhas na vertical sobre o alvo.

De modo a localizar o ponto sobre o alvo em cada linha na região com maior variação de contraste, comparou-se a função de média móvel de 4 posições com a função normal com os valores em DN. Deste modo, foi possível encontrar a região com maior variação de contraste. Neste caso, optou-se pela média móvel, uma vez que é uma função que permite diminuir a variação de valores, sendo que quanto maior os valores, menor a sua variação. Segue-se o Fluxograma 5.3, onde é demonstrado o procedimento do algoritmo.



Fluxograma 5.3 Algoritmo para encontrar qual a região com maior nível de contraste em 3 linhas.

Foram seleccionados os três pontos sobre o alvo na imagem *stereo* da esquerda, nas linhas 111, 125 e 142 entre as colunas 50 e 200, para um determinado alvo. Quanto a escolha das linhas foi realizada de forma aleatória, sendo considerado apenas o facto de as linha se encontrarem relativamente perto do centro, sendo a região com menos distorção.

Na Figura 5.12, encontra-se representadas as três funções com os valores normais em DN relativamente a cada *pixel* para cada linha.

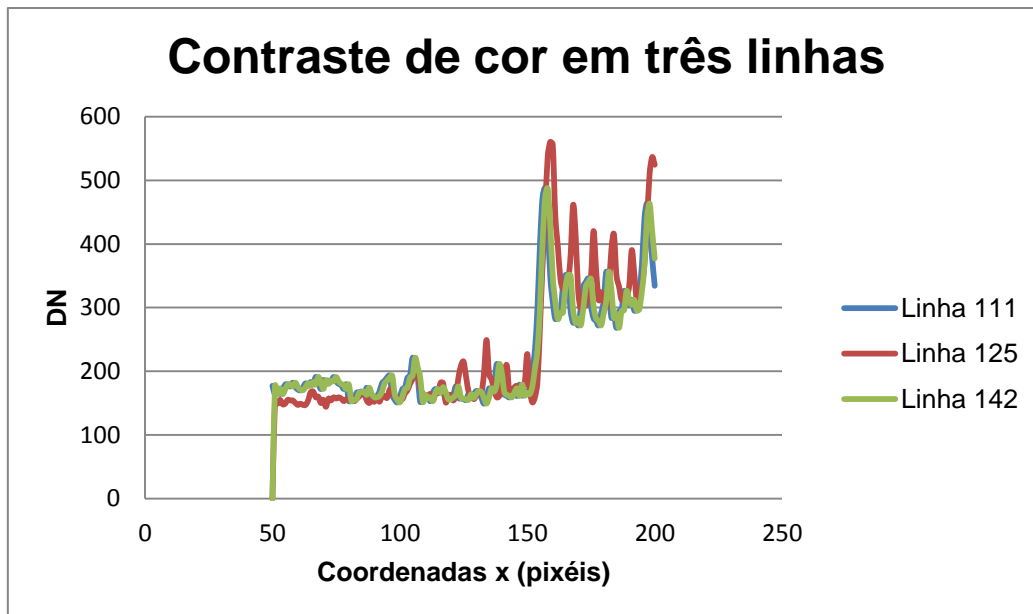


Figura 5.12 Gráficos com a representação das três funções de cada linha.

De modo a demonstrar um exemplo prático de como encontrar o ponto sobre o alvo dinamicamente, considerou-se a linha 111, conforme representada na Figura 5.13, em que o traço a cor vermelha corresponde à função normal, o traço a cor verde à função com média móvel de 4 posições, sendo considerada na média móvel a posição atual e as três seguintes, e o traço a cor azul o erro (a função do módulo da diferença das duas funções anteriores), em que a posição do ponto sobre o alvo será onde o erro for maior, que neste caso o erro encontrava-se na coluna 153.

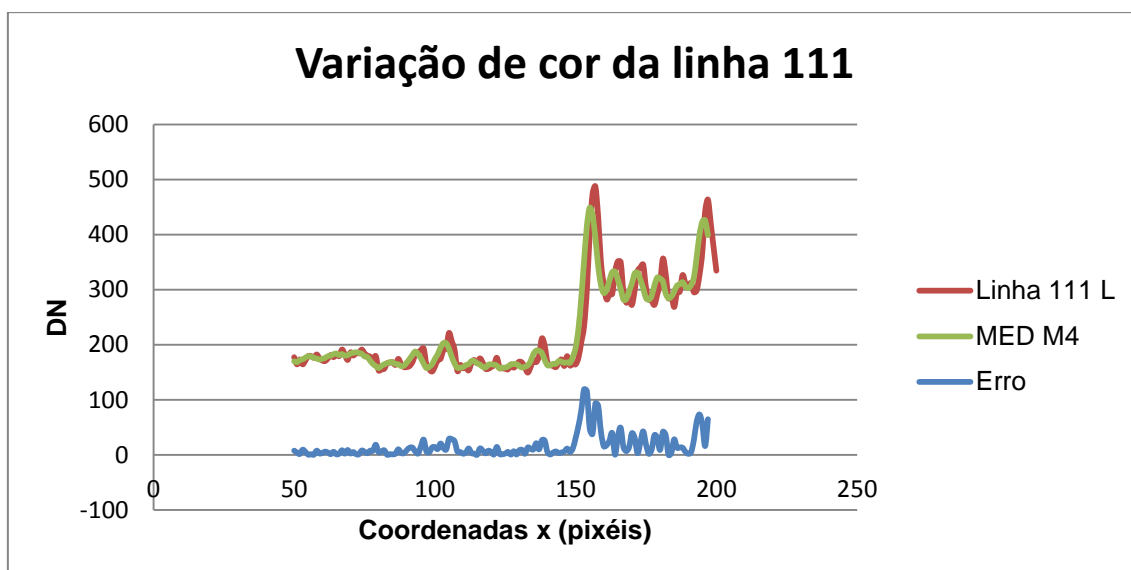


Figura 5.13 Funções para determinar a região com maior contraste em DN na linha 111.

Procedendo com a análise temporal, nesta experiência foi considerada uma sequência de 10 *frames*, em que no primeiro *frame* foram encontradas as três coordenadas dos pontos sobre o alvo com as referências nas pesquisas, encontrados através do método descrito anteriormente. Note-se que as posições dos pontos encontrados dinamicamente serviram de referência em toda a sequência dos 10 *frames*.

Segue-se a Tabela 3 com os dados obtidos no cálculo da profundidade, na sequência de 10 *frames* com três pontos sobre o alvo fixos por *frame*, com uma profundidade de 7,3 mm.

Tabela 3 Dados obtidos para a profundidade de 7,3 mm.

<b>Alvo</b>	<b>Frame</b>	<b>Profundidade</b>
1	0	1,0525
2	0	1,5804
3	0	7,2994
1	1	10,503
2	1	6,9794
3	1	7,2994
1	2	2,816
2	2	4,2116
3	2	7,2994
1	3	4,4767
2	3	10,503
3	3	7,2994
1	4	6,1527
2	4	7,2994
3	4	7,2994
1	5	6,6831
2	5	7,2994
3	5	7,2994
1	6	1,7617
2	6	3,4736
3	6	7,2994
1	7	2,5928
2	7	7,646
3	7	6,9794
1	8	6,6831
2	8	7,2994
3	8	7,2994
1	9	1,0162
2	9	11,162
3	9	7,2994

De forma a facilitar a análise da estimativa de profundidade, foi criado um gráfico com a média acumulada da profundidade, representada na Figura 5.14.

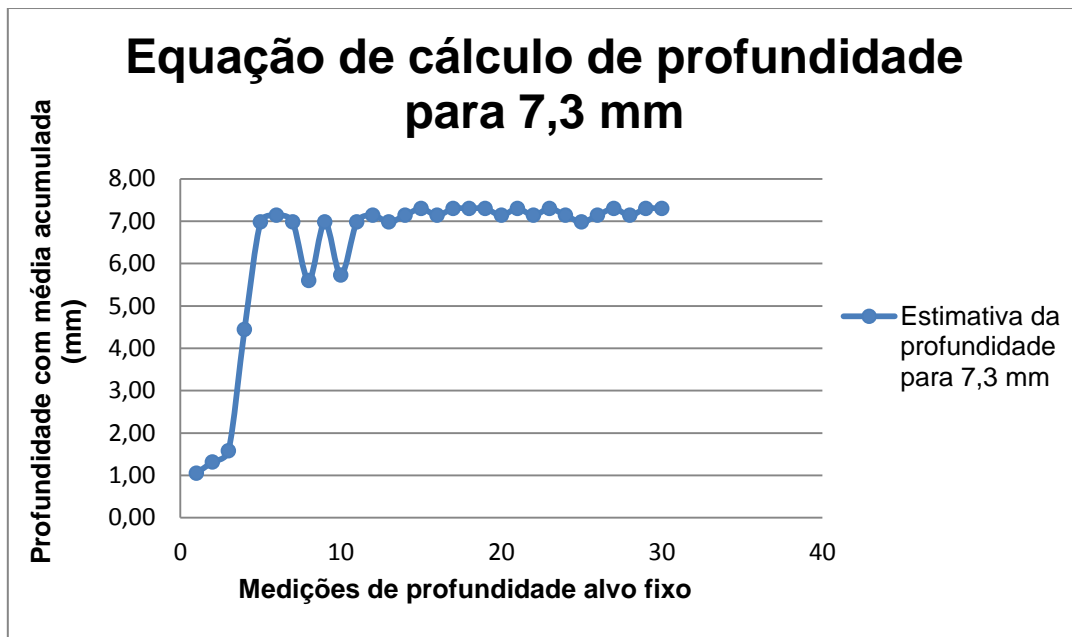


Figura 5.14 Método de cálculo de profundidade com média acumulada até 30 cálculos de profundidade.

Através deste estudo, verifica-se que a partir do décimo segundo cálculo de profundidade o valor converge para a profundidade correta, correspondendo à média dos três pontos sobre o alvo por *frame* em quatro *frames*, totalizando doze cálculos de profundidades.

De forma a comprovar os resultados anteriores obtidos, será realizada uma nova experiência com uma sequência de 100 *frames*, agrupados em sequências de 10 *frames*, tal como na experiência anterior, em que os pontos sobre o alvo foram encontrados na primeira *frame* de cada sequência. Quanto ao cálculo de profundidade foi apresentada a média acumulada por *frames*, repetindo-se a cada sequência de 10 *frames*. Por exemplo, na segunda *frame* a profundidade corresponde à média acumulada de seis cálculos e na quinta *frame* corresponde à profundidade da média acumulada de quinze cálculos.

Os resultados das médias acumuladas para cada sequência encontram-se representados graficamente com cores diferentes, conforme consta na Figura 5.15.

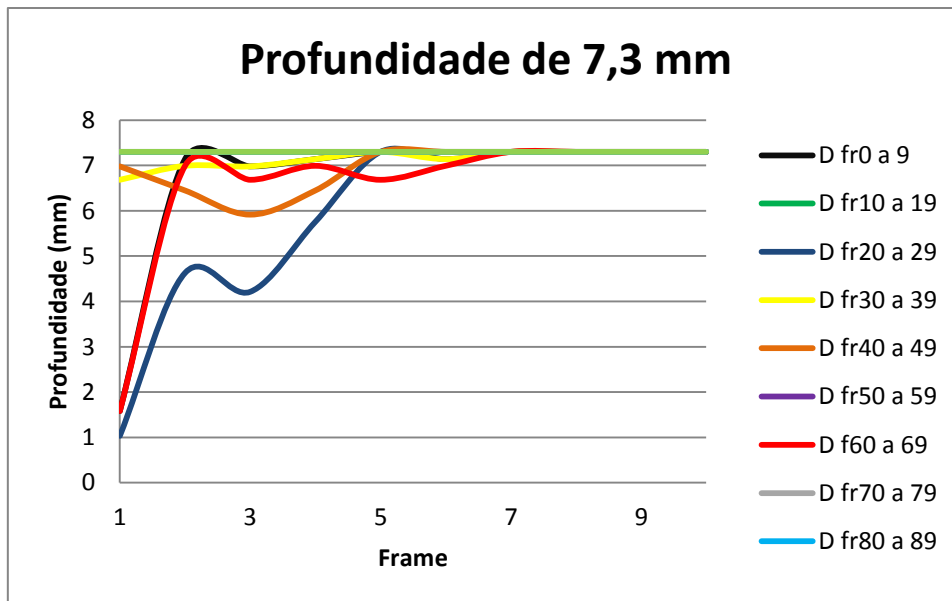


Figura 5.15 Gráfico com médias as acumuladas de três cálculos de profundidade por *frame*.

Verificou-se que os cálculos de profundidade devem ser determinados através de médias. De forma a verificar o erro em percentagem relativamente à distância medida acumulada por *frame*, apresentam-se os gráficos representados na Figura 5.16.

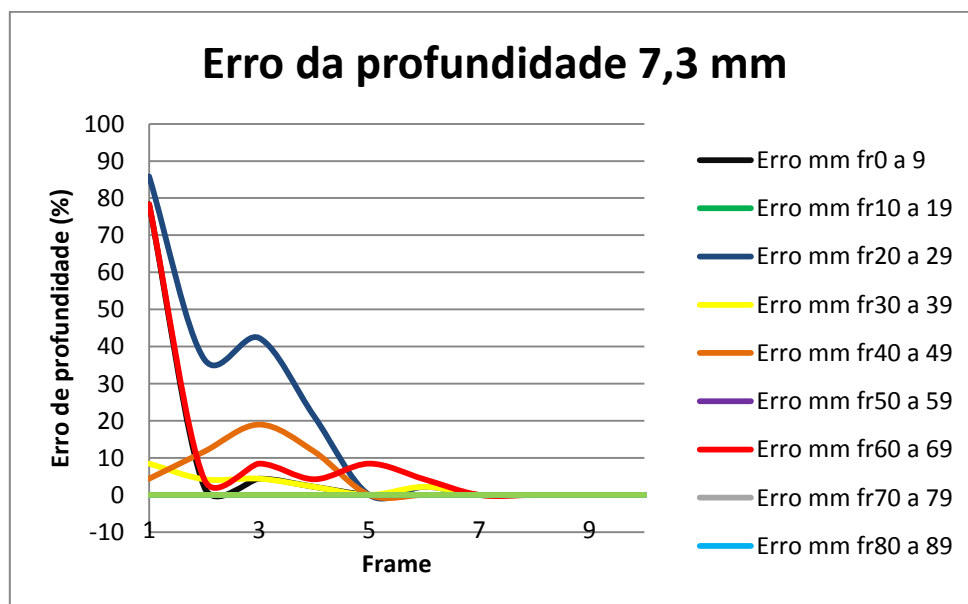


Figura 5.16 Gráficos com os erros relativamente às médias acumuladas.

A partir da quinta *frame*, os erros nos cálculos de profundidade são baixos e, a partir da sétima *frame*, todos os valores convergem para o cálculo correto. Deste modo, para o cálculo da profundidade, considerou-se que, para cada ponto sobre o alvo, a média de profundidades foi considerada numa sequência de sete imagens consecutivas, uma vez que apresentavam o valor de erro

mínimo observado, ou seja, sequências superiores a sete imagens não apresentavam melhorias na precisão da detecção de distância.

### 5.3.1 Análise temporal para diversas distâncias

Para a realização da análise temporal [30], foi tido como referência a realização de um estudo do alvo, representado na Figura 5.17. O alvo encontrava-se fixo em cada medição e as amostras foram obtidas entre as profundidades de 1 mm a 21 mm, com intervalos entre amostras de aproximadamente 1 mm.

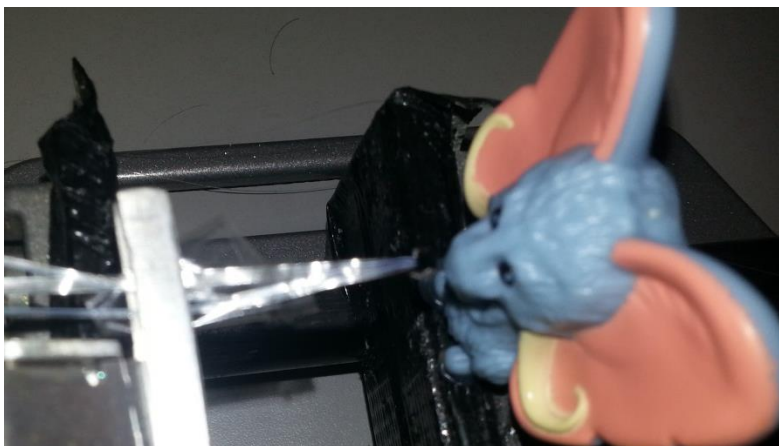


Figura 5.17 Alvo para o estudo da sequência de 100 *frames* em diversas profundidades.

Para cada cálculo de profundidade foi considerada a média acumulada de sete *frames* e três pontos sobre o alvo por *frame*, conforme a experiência anterior. Os resultados são apresentados na Figura 5.18, sendo que no eixo das abscissas são apresentadas as amostras e no eixo das ordenadas os valores obtidos por amostra. De referir que o método utilizado para a criação do gráfico será mantido nas restantes amostras apresentadas.

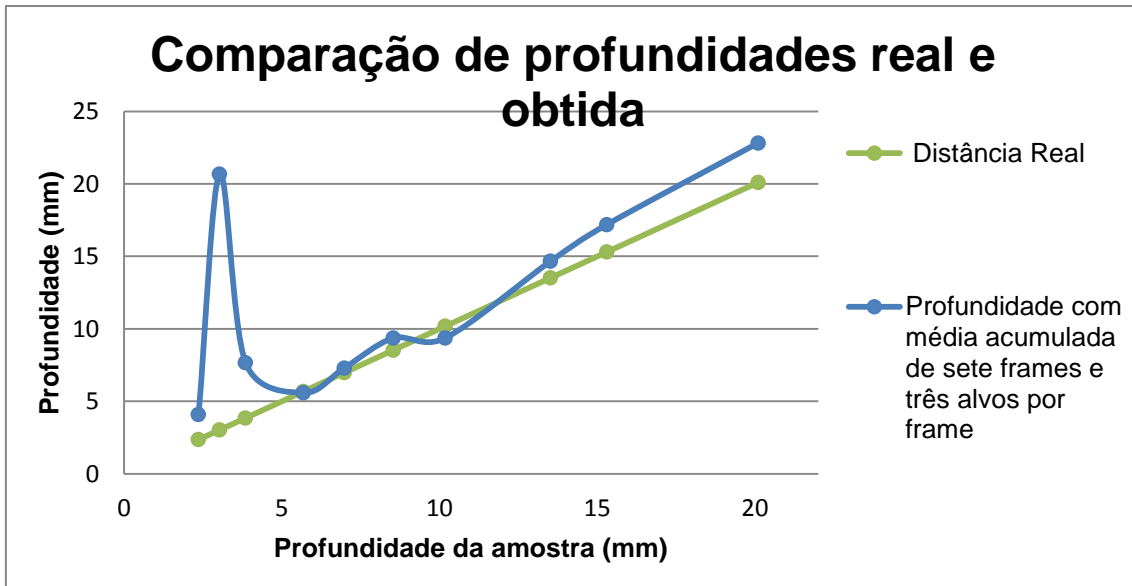


Figura 5.18 Gráfico com a comparação da profundidade medida com a profundidade estimada, através da média de 7 frames e 3 pontos sobre o alvo em cada frame.

De forma a verificar os erros em percentagem relativamente a cada profundidade, criou-se o gráfico que se encontra representado na Figura 5.19.

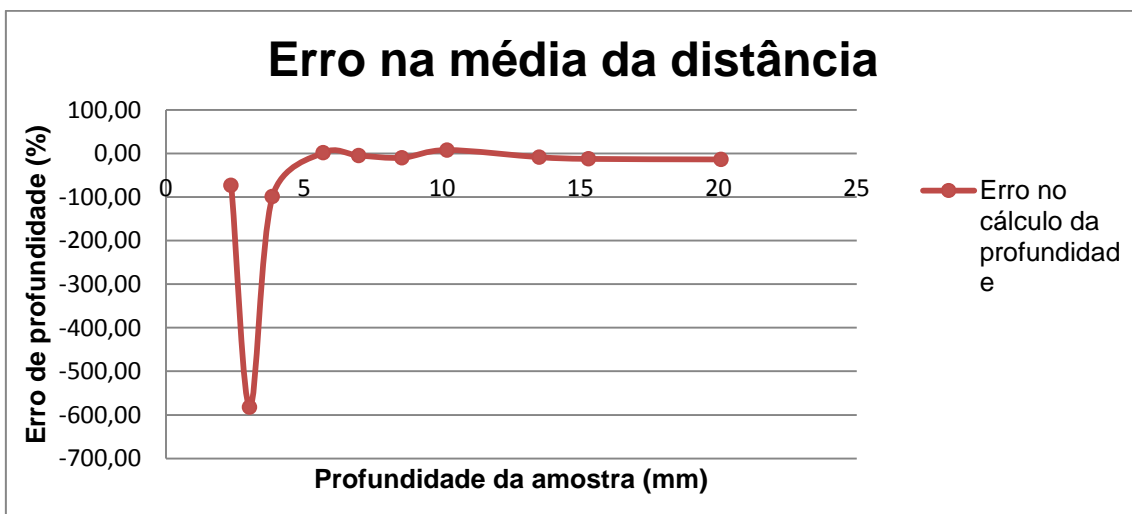


Figura 5.19 Erro na estimava da profundidade calculada com a média de 7 frames e 3 pontos sobre o alvo por frame.

Verificou-se que para curtas profundidades os erros era elevados.

De modo a melhorar a rapidez do sistema, para o cálculo da profundidade calculou-se apenas um ponto sobre o alvo por frame, sendo este seleccionado na região de maior variação de contraste nas três linhas (111; 125; 142) das amostras relativas à primeira frame. Deste modo, o cálculo foi determinado com a média acumulada de sete frames, e calculada a profundidade com as mesmas amostras, conforme representado na Figura 5.20.

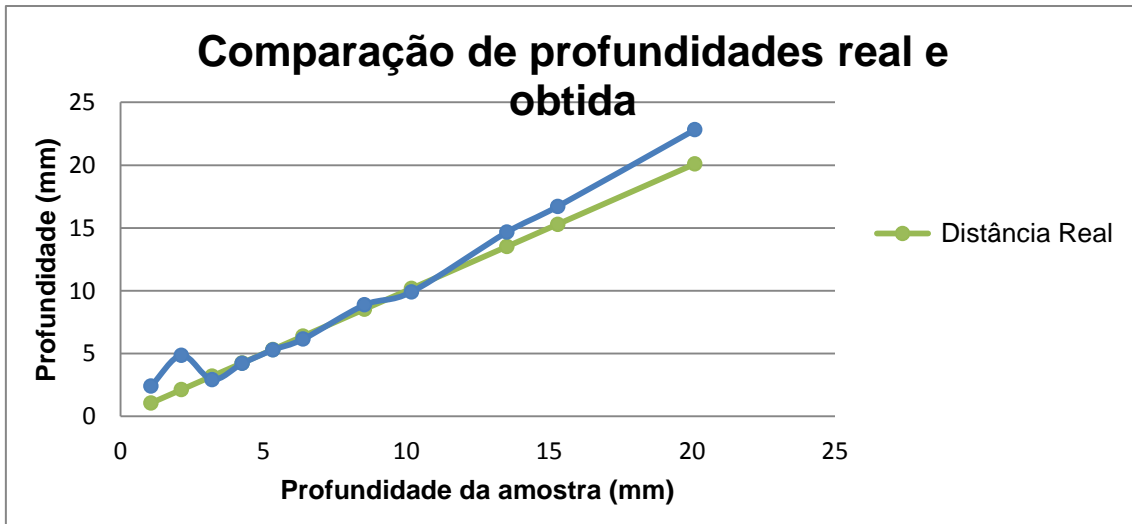


Figura 5.20 Cálculo de profundidade através de média de 7 frames.

De forma a verificar o erro, criou-se o gráfico que se encontra representado no gráfico da Figura 5.21.

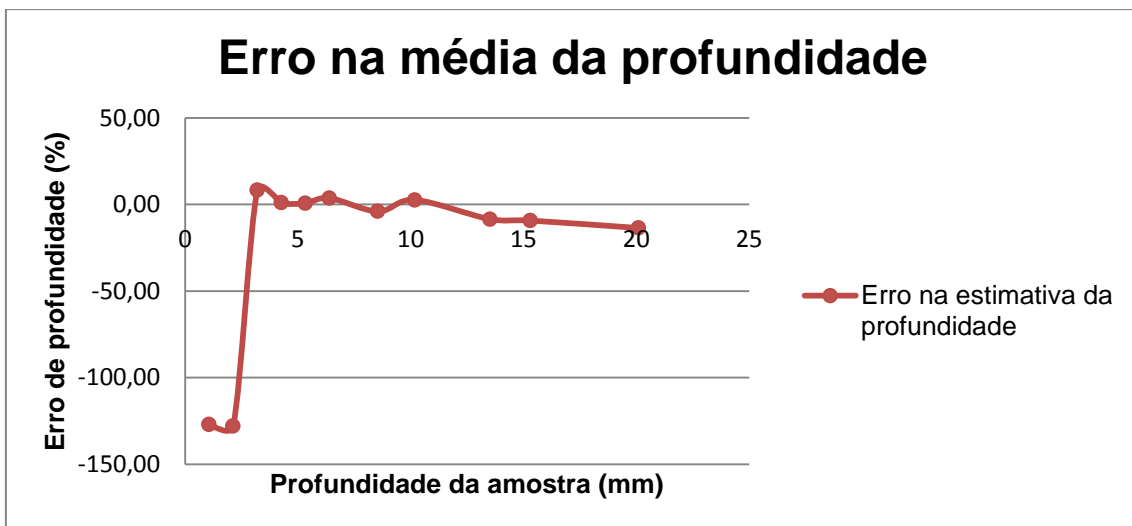


Figura 5.21 Erro no cálculo de profundidade com média de 7 frames.

Verificou-se que, considerando o melhor ponto sobre o alvo em termos de contraste das três linhas, os cálculos melhoravam a precisão e o tempo de cálculo era mais rápido.

### 5.3.1 Análise de resultado em câmara escura

Como o sensor NanEye opera dentro do corpo humano, em ambientes escuros, foi necessário isolar o cenário, de modo a que não existisse luz proveniente do exterior. Posteriormente, foram obtidas novas amostras para mesmo alvo e para as mesmas profundidades utilizadas anteriormente, com a alteração do ambiente para escuro e a introdução de luminosidade controlada

manualmente, até se encontrar a intensidade luminosa que mais se adequasse, sendo esta relativamente baixa.

Após calcular as novas profundidades estas foram apresentadas na Figura 5.22

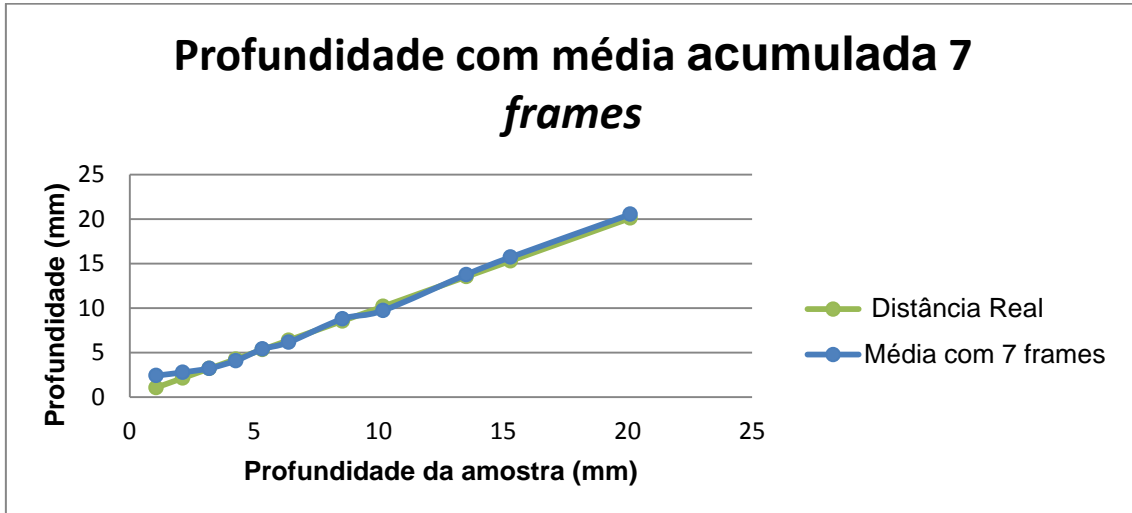


Figura 5.22 Cálculo da profundidade em câmara escura.

Na Figura 5.23 encontra-se representado o erro no cálculo da profundidade,

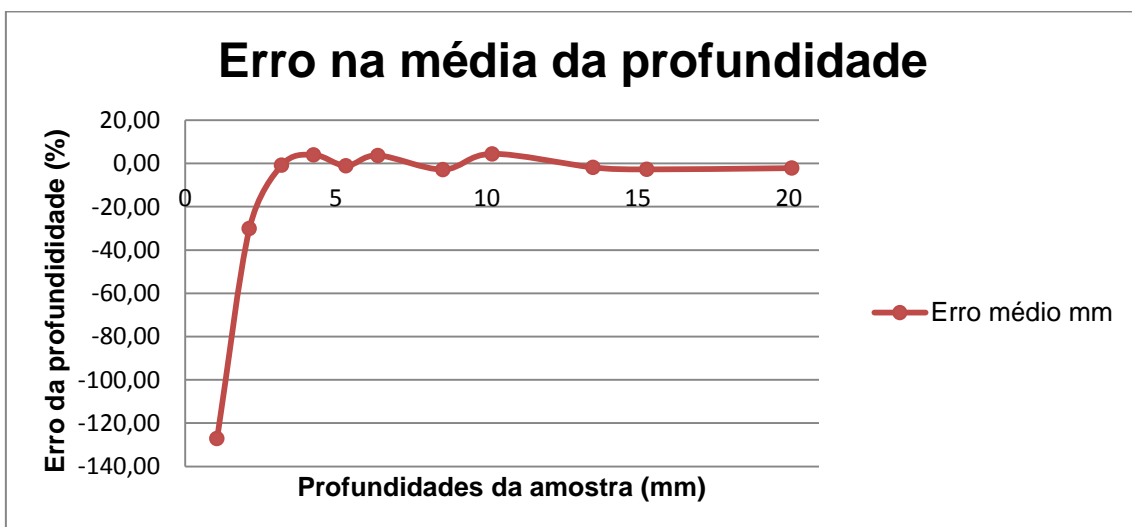


Figura 5.23 Erro no cálculo da profundidade em câmara escura.

Verificou-se uma melhoria significativa na precisão de cálculo, no entanto, os valores para profundidades curtas continuaram com erros elevados. Como solução, limitaram os cálculos entre as gamas de valores 2 a 22 mm, resultando no gráfico dos erros, apresentado na Figura 5.24.

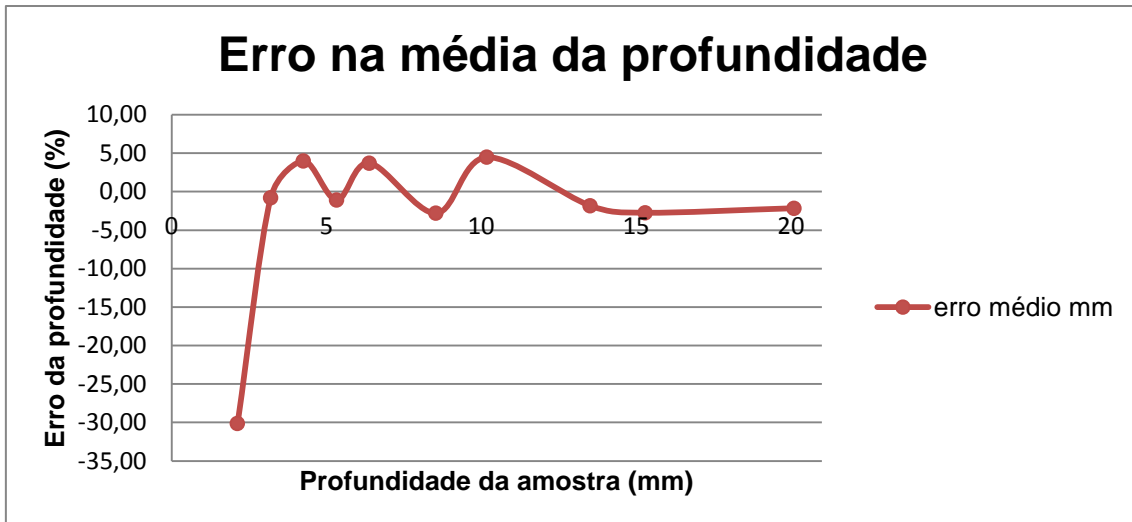


Figura 5.24 Erros nos cálculos da profundidade entre 2 a 22mm.

É possível analisar melhor os erros, verificando-se que a grande maioria apresenta erros inferiores a 5 % relativamente às suas distâncias. A profundidade de 2,13 mm apresenta um erro de 30 %, o que corresponde a um erro de profundidade de 0,64 mm.

## 5.4 Correção da distorção da lente

O sensor NanEye apresenta distorção negativa, também denominada de distorção em barril [10], sendo esta mais acentuada, à medida que aumenta a distância do centro para as extremidades das imagens. Esta distorção caracteriza-se por parte da representação de cada *pixel* ser deslocada para os *pixéis* adjacentes em direção ao centro da imagem [29].

De forma a caracterizar essa distorção e efetuar a correção, realizou-se uma experiência, em que no alvo se encontrava uma fita métrica colocada na horizontal, conforme representado na Figura 5.25.

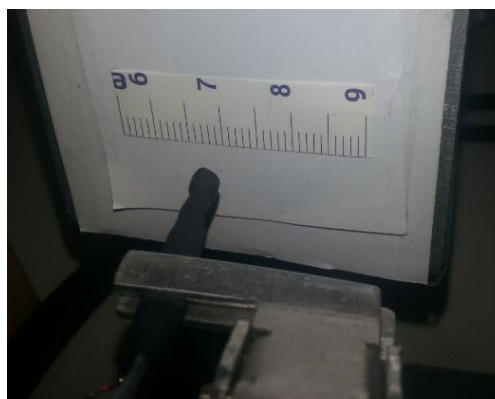


Figura 5.25 Alvo com fita métrica.

Na primeira experiência consideraram-se três pontos sobre o alvo, conforme representado na Figura 5.26.

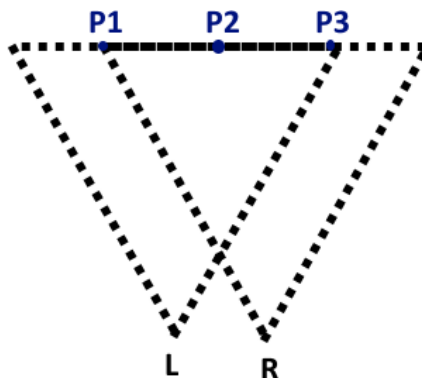


Figura 5.26 Localização dos pontos sobre o alvo P<sub>1</sub>, P<sub>2</sub> e P<sub>3</sub>.

A profundidade escolhida para o ponto sobre o alvo P<sub>2</sub> foi de 11,72 mm, seguindo-se o ajuste do alvo, de modo a que as profundidades de P<sub>1</sub> e P<sub>3</sub> fossem iguais, sendo o valor de profundidade determinado pelo algoritmo de 18,7 mm. Quanto à distância entre P<sub>1</sub> e P<sub>3</sub>, foi de 16 mm com o ponto sobre o alvo de P<sub>2</sub> no centro de ambos conforme a Figura 5.27.

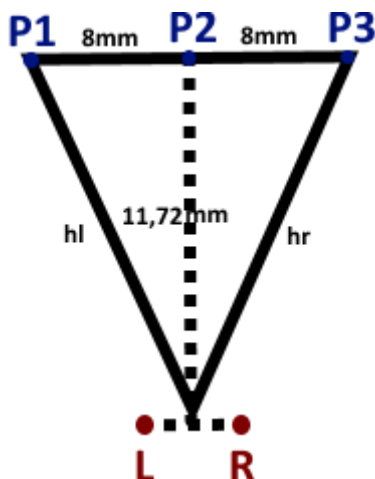


Figura 5.27 Cenário com medições realizadas sobre o alvo.

As profundidades de P<sub>1</sub> e P<sub>2</sub> eram determinadas a partir de  $hl = hr = \sqrt{11,72^2 + 8^2} = 14,19$  mm, sendo o erro de profundidade =  $14,19 - 18,7 = -4,51$  mm. Comprovou-se assim que a lente provocava uma distorção.

Realizou-se o mesmo procedimento para as restantes profundidades. Posteriormente elaborou-se um gráfico com os erros em percentagem, representado na Figura 5.28, em que o eixo das abcissas corresponde aos valores de profundidade e o eixo das ordenadas aos erros em percentagem relativamente aos valores medidos.

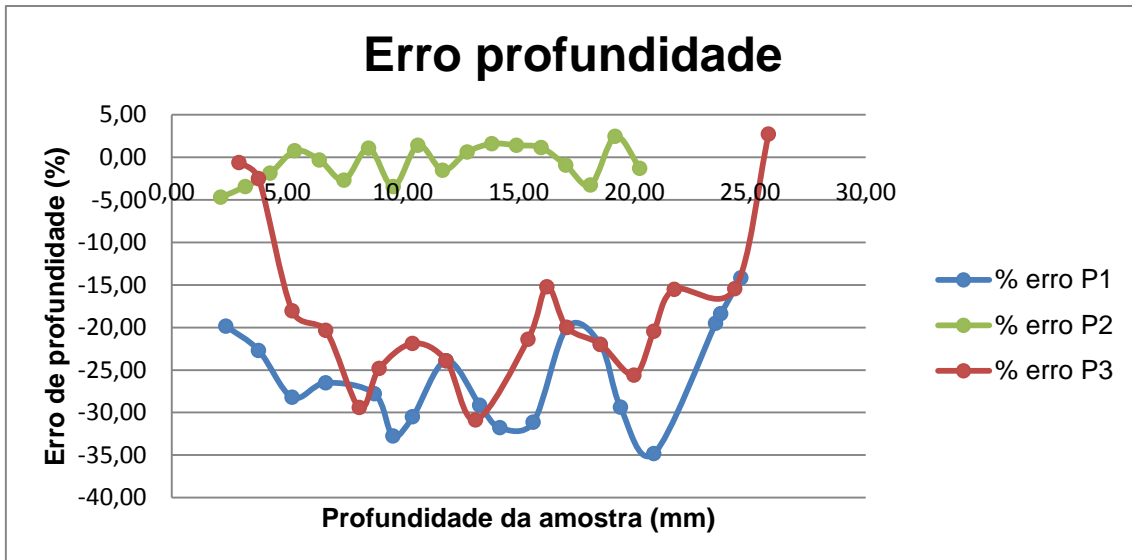


Figura 5.28 Gráfico com os erros relativamente aos valores estimados para os três pontos sobre o alvo.

O ponto sobre o alvo  $P_2$  situava-se mais no centro das imagens. Nessa região os erros são baixos relativamente aos pontos  $P_1$  e  $P_3$  situados nas extremidades das imagens, pelo que a distorção afeta os cálculos de profundidades.

Sabendo os valores de profundidades medidos para cada ponto sobre o alvo e os erros calculados, é possível corrigir a distorção nas imagens, deslocando a representação dos pixels no sentido oposto ao deslocamento, provocado pela lente aquando da criação da imagem.

Para a correção da distorção foi necessário encontrar uma função que definisse o comportamento do deslocamento de cada *pixel* em função da sua localização em relação ao centro da imagem, uma vez que no centro da imagem a distorção é mínima e nas extremidades a distorção é máxima [7] e [10].

O comportamento da distorção pode ser corrigido em função do raio de localização pelo *pixel* através da equação (5.2).

$$F(x) = \frac{\tan^{-1}(x)}{(x)} \quad (5.2)$$

De forma a verificar o comportamento da função, criou-se o gráfico com a função no intervalo de  $-10 \leq x \leq 10$ , representado na Figura 5.29.

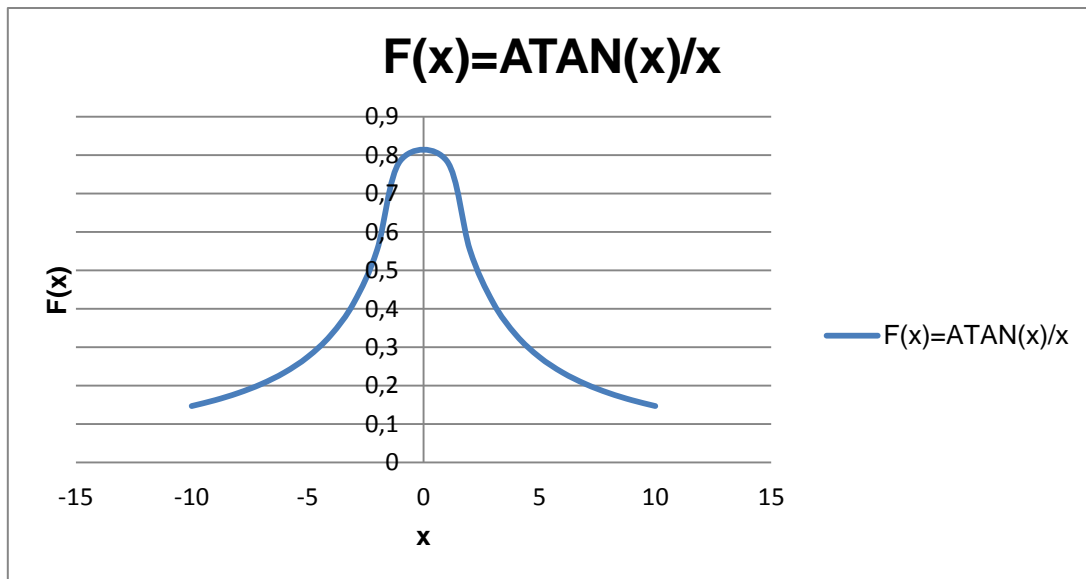


Figura 5.29 Comportamento de  $F(x)$  no intervalo de  $-10 \leq x \leq 10$ .

E para a correção da distorção foi calculado o raio, através da equação (5.3):

$$R = \sqrt{(125 - x)^2 + (125 - y)^2} \quad (5.3)$$

Após calcular o raio é necessário efetuar a mudança para valores unitários entre 0 e 1 através da equação (5.4)

$$R_{\text{unit.}} = \frac{R}{R_{\text{Max}}} = \frac{R}{176,77} \quad (5.4)$$

Para verificar o comportamento de raio unitário ( $R_{\text{unit.}}$ ) consideraram-se os *pixéis* das coordenadas (1,1) até (250,250), descrevendo uma trajetória diagonal da imagem passando pelo centro (125,125), e criou-se um gráfico em que no eixo das abcissas é apresentada as coordenadas dos pixels e no eixo das ordenadas o valor unitários de  $R_{\text{unit.}}$ , conforme representado na Figura 5.30.

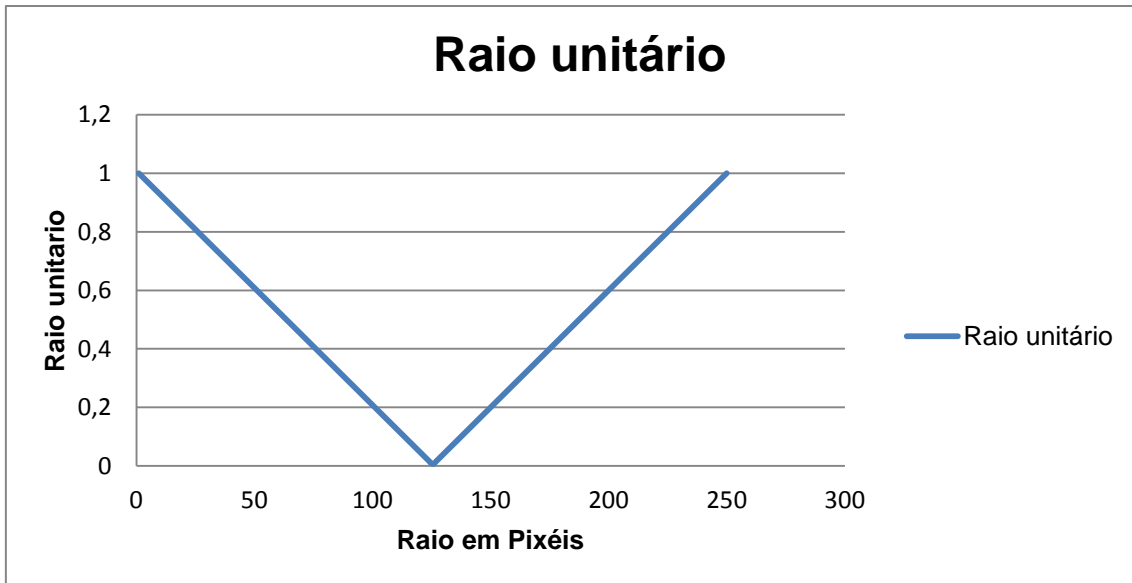


Figura 5.30 Comportamento de  $R_{unit.}$

Na Figura 5.30 verificou-se o comportamento pretendido com valor máximo nas extremidades e o valor mínimo no centro da imagem.

$R_{unit.}$  foi aplicado na equação (5.2), substituindo o valor de  $x$ . Considerando as mesmas coordenadas que no caso anterior, criou-se o gráfico, em que no eixo das abscissas foi considerada a distância em *pixels* e no eixo das ordenadas o valor resultante da correção do deslocamento, conforme a Figura 5.31. Verificou-se que à medida que a distância do centro da imagem aumenta, os seus valores diminuem.

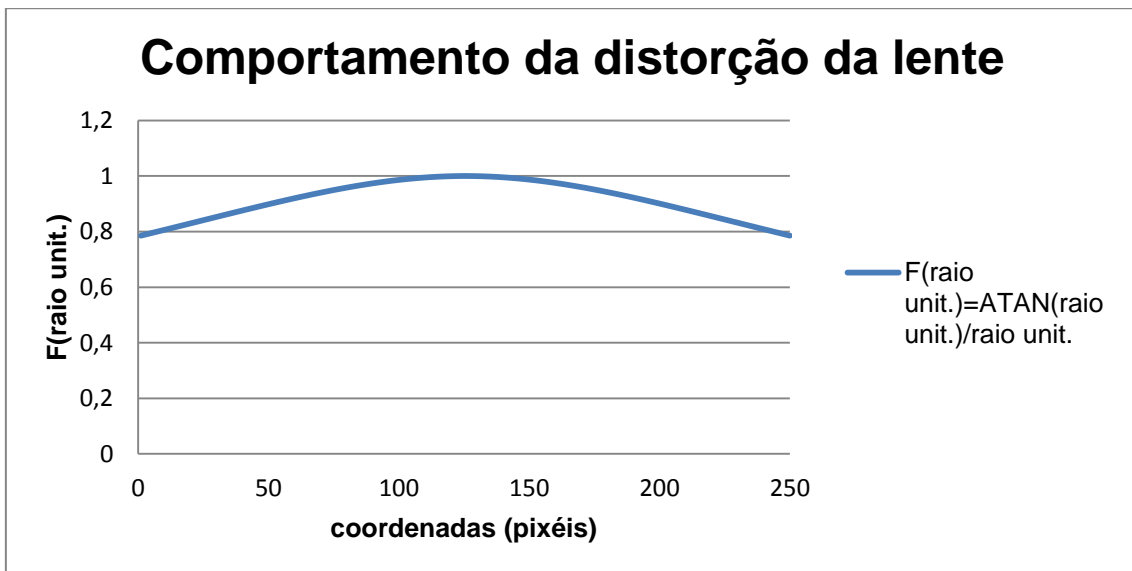


Figura 5.31 Comportamento do deslocamento dos *pixels*.

Após aplicar a distorção na imagem, verificou-se que era necessário aplicar um ganho ao raio, de forma a ajustar a distorção criada pela lente, resultando na equação (5.5).

$$\text{Correção do deslocamento} = \frac{\tan^{-1}(R_{\text{unit.}} \times \text{Ganho})}{(R_{\text{unit.}} \times \text{Ganho})} \quad (5.5)$$

Para encontrar o ganho a ser aplicado, voltou-se à experiência realizada anteriormente, apresentada na Figura 2.10 e ajustou-se o ganho até que o valor das profundidades de P<sub>1</sub> e P<sub>3</sub> ficassem corretos com o valor de 14,19 mm. O ganho resultante a aplicar correspondem ao valor de 0,5.

Após encontrar o ganho, foram verificadas as correções das profundidades nos mesmos pontos sobre o alvo presente na Figura 5.28, resultando no gráfico da Figura 5.32,

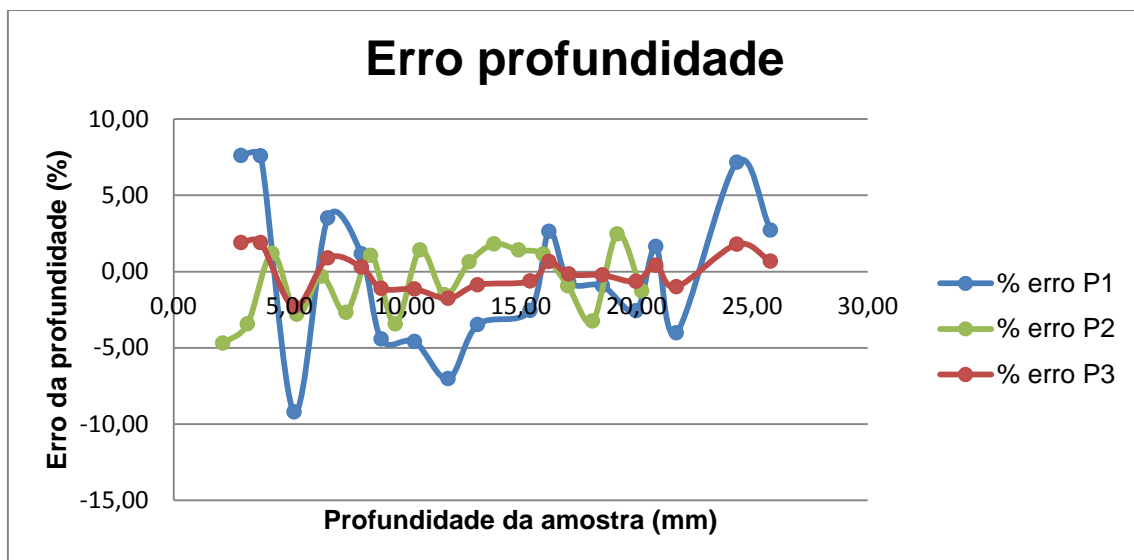
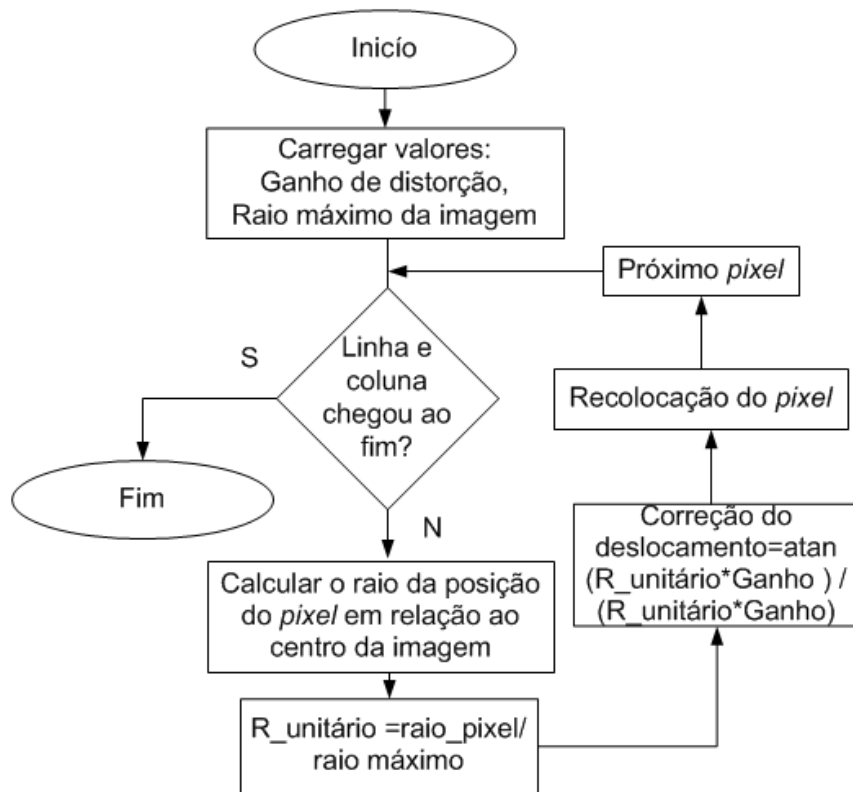


Figura 5.32 Gráfico com erros após a calibração da distorção da lente.

Verificou-se que os erros nos cálculos das distâncias diminuíram para valores abaixo dos 10 %, principalmente nos cálculos de profundidades nos pontos sobre o alvo nas laterais.

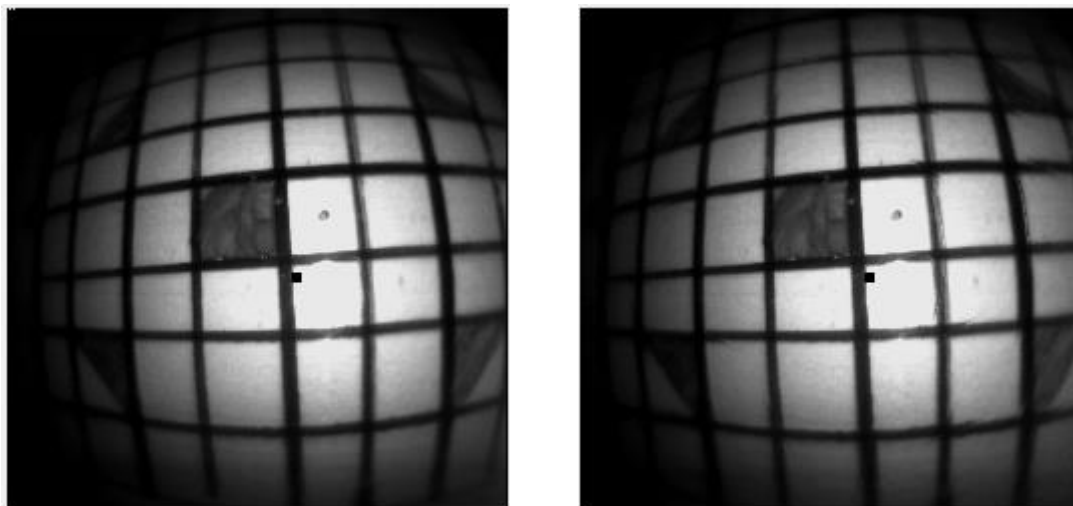
Nesta fase foi necessário aumentar a limitação do cálculo de profundidade de 22mm para 26mm, uma vez que de acordo com a Figura 5.27 os pontos sobre o alvo P<sub>1</sub> e P<sub>3</sub> se encontravam nas laterais das imagens *stereo* e eram mais profundos relativamente ao ponto sobre o alvo P<sub>2</sub> que se encontrava no centro da imagem.

Tendo por base a correção da distorção nas lentes, criou-se o Fluxograma 5.4 para ajudar a compreender como foi criado o algoritmo,



Fluxograma 5.4 Algoritmo de correção da distorção.

De forma a comparar a correção, selecionou-se uma imagem e efetuou-se a comparação com e sem distorção da lente.



a)

b)

Figura 5.33 Comparação da mesma imagem: a) Com distorção e b) Sem distorção.

Verificam-se que, após a correção da distorção as linhas ficam ligeiramente mais retas e os cálculos de profundidades para os pontos sobre o alvo mais afastados foram determinados com maior precisão.

## 5.5 Medição de estruturas

De acordo com o ponto anterior, efetuou-se a correção da distorção provocada pela lente, de modo a que as medições de estruturas entre dois pontos sobre o alvo, situados fora do centro da imagem, pudessem ser calibradas.

Para a medição de estruturas serão introduzidas pelo utilizador as coordenadas de dois pontos sobre o alvo na imagem da esquerda, e será determinada a distância entre os pontos sobre o alvo, correspondendo à dimensão da estrutura.

Para calcular a distância entre os dois pontos sobre o alvo para a mesma profundidade é necessário definir uma escala. Essa escala será atribuída de modo dinâmico. Segue-se o exemplo, na Figura 5.34 onde se encontram representadas duas imagens que captam a escala de uma fita métrica, sendo que a Figura a) corresponde a curtas profundidades, e a Figura b) a longas profundidades.

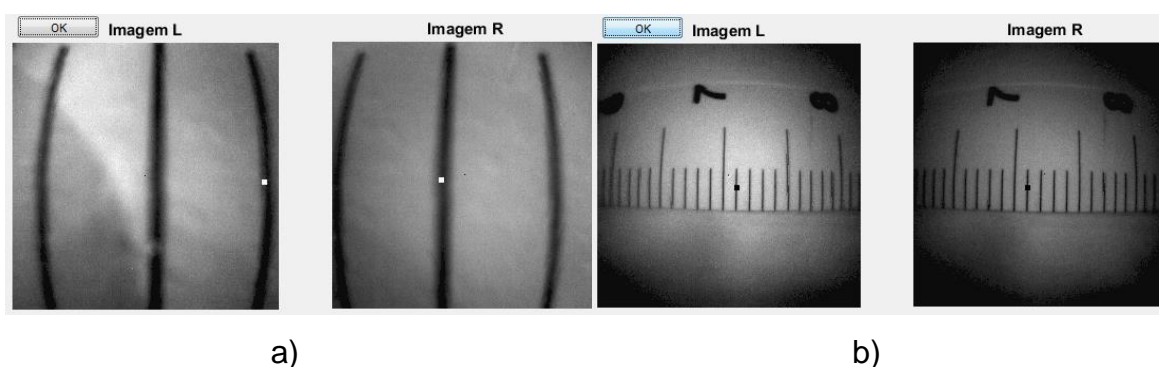


Figura 5.34 Comparação de escalas: a) curtas profundidades e b) longas profundidades.

Verifica-se que para profundidades diferentes a distância de 1 mm é diferente, requerendo maior quantidade de *pixéis* para representar 1 mm, relativamente a profundidades maiores.

Anteriormente, após a calibração da distorção, foram verificadas as profundidades para três pontos sobre o alvo a diferentes profundidades, conforme representado na Figura 5.27. A utilização de uma fita métrica permitiu saber a distância entre os pontos sobre o alvo.

Assim, é possível criar uma função que defina uma escala para determinar a distância entre pontos sobre o alvo, sabendo a que profundidade o objeto se encontra.

Para cada profundidade, verificou-se a quantidade de *pixéis* necessários para determinar 1 mm, e construiu-se o gráfico representado na Figura 5.35, em que o eixo das abscissas corresponde ao valor de profundidade, apresentada de forma diferente, através da quantidade de *pixéis* resultante de  $x_l - x_r$ , uma vez que a profundidade, era calculada com base nessa variação, de acordo com a

equação (4.10). O eixo das ordenadas refere-se ao ganho encontrado que ao ser multiplicado pela diferença dos *pixéis* apresentados no eixo das abscissas, correspondia à escala de 1mm, sendo desta forma encontrada a distância entre pontos sobre o alvo.

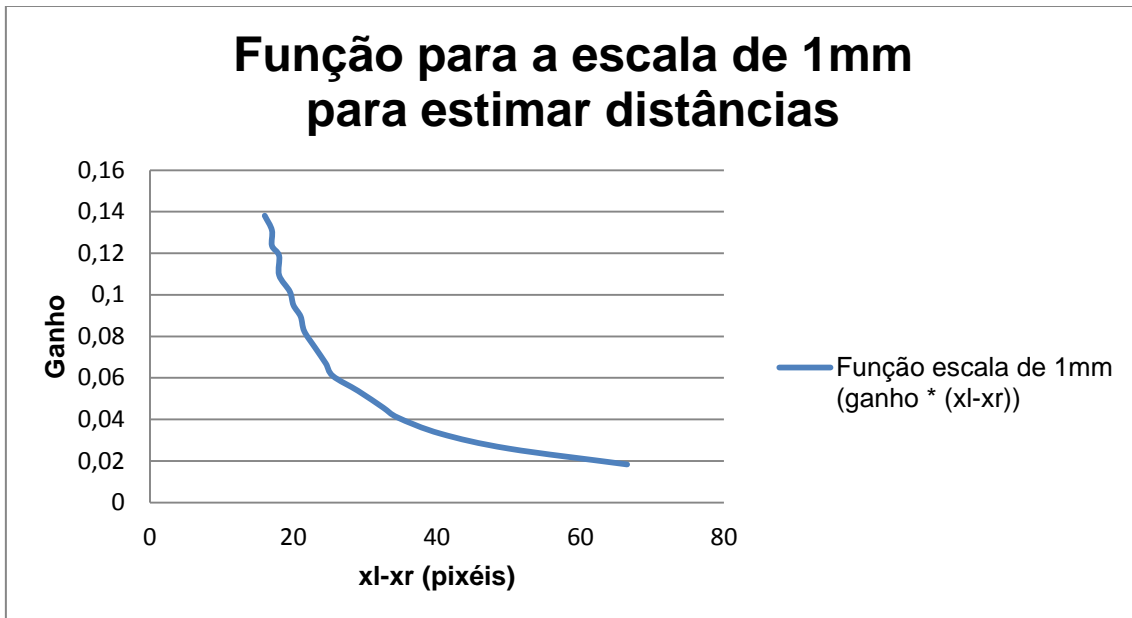


Figura 5.35 Gráfico com a função da escala de 1mm na medição de estruturas.

A função representada no gráfico anterior foi aproximada por retas, de modo a ser implementada no algoritmo. As retas obtidas são apresentadas na Figura 5.36,

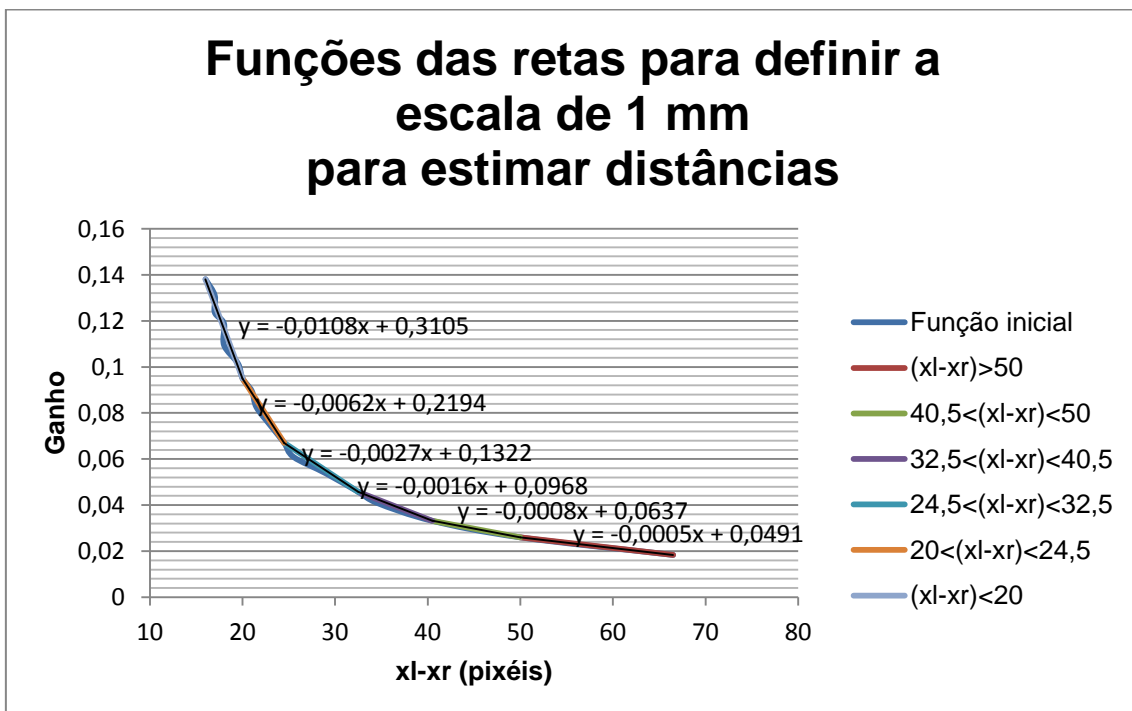
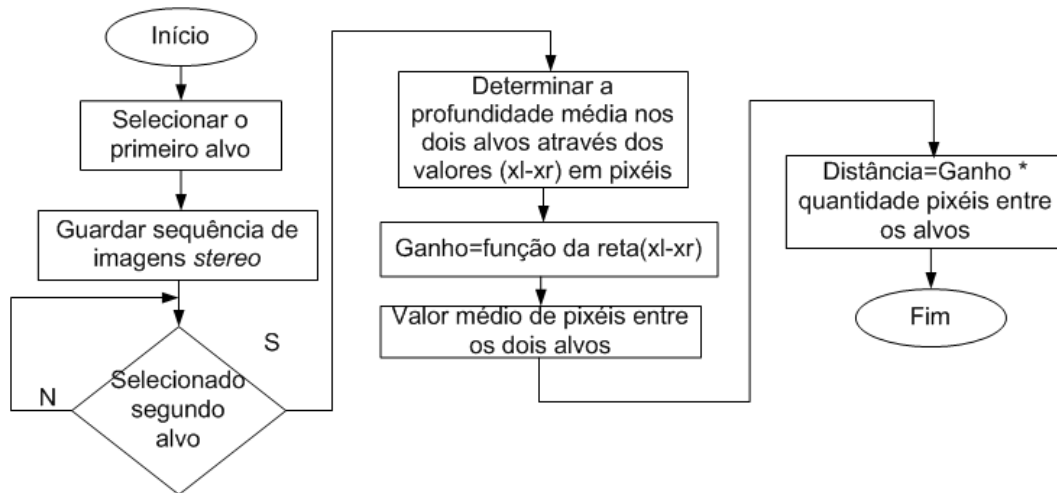


Figura 5.36 Gráfico com as funções das retas de aproximação da função com a definição de escala de 1mm para a calcular distâncias.

Segue-se o Fluxograma 5.5, de modo a compreender como era determinada a distância entre os dois pontos sobre o alvo.



Fluxograma 5.5 Algoritmo que determina a distância entre os pontos sobre o alvo.

Posteriormente com o objetivo de comprovar o comportamento do sistema de medição de estruturas, foi realizada uma experiência, que consistiu em medir a mesma estrutura e a diferentes profundidades, com o objetivo de verificar se o sistema era capaz de medir corretamente as estruturas, independentemente da profundidade entre a câmara *stereo* e o objeto. Na Figura 5.37 encontra-se representado o alvo, em que foi realizada a experiência, sendo assinalados a branco os pontos sobre o alvo e a vermelho a dimensão da estrutura de 3,5 mm, sobre a imagem *stereo* da esquerda.

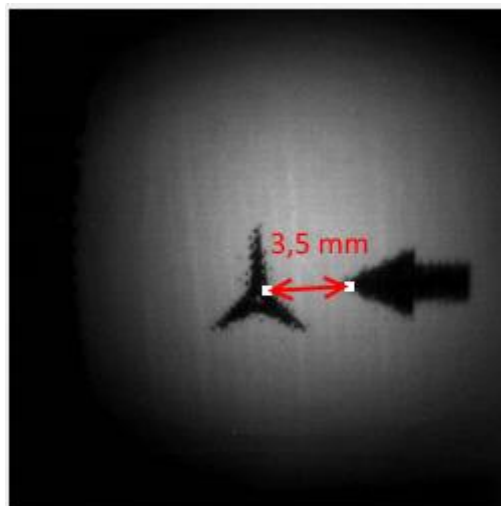


Figura 5.37 Localização da estrutura medida de 3,5 mm sobre a imagem *stereo* da esquerda.

Após a realização das diversas medições, estas foram representadas na Figura 5.38 através do mapa cartesiano, em que o eixo das abcissas corresponde à profundidade em que a estrutura foi medida e o eixo das

ordenadas corresponde aos valores obtidos através do sistema criado para as medições de estruturas.



Figura 5.38 Medição de uma estrutura de 3,5 mm a diferentes profundidades.

Outra forma de avaliar as medições passou por verificar os erros em porcentagem relativamente às medições corretas de 3,5 mm, assim sendo foram mantidos os valores das profundidades no eixo das abcissas e no eixo das ordenadas os erros em porcentagem relativamente à dimensão da estrutura, conforme representada na Figura 5.39.

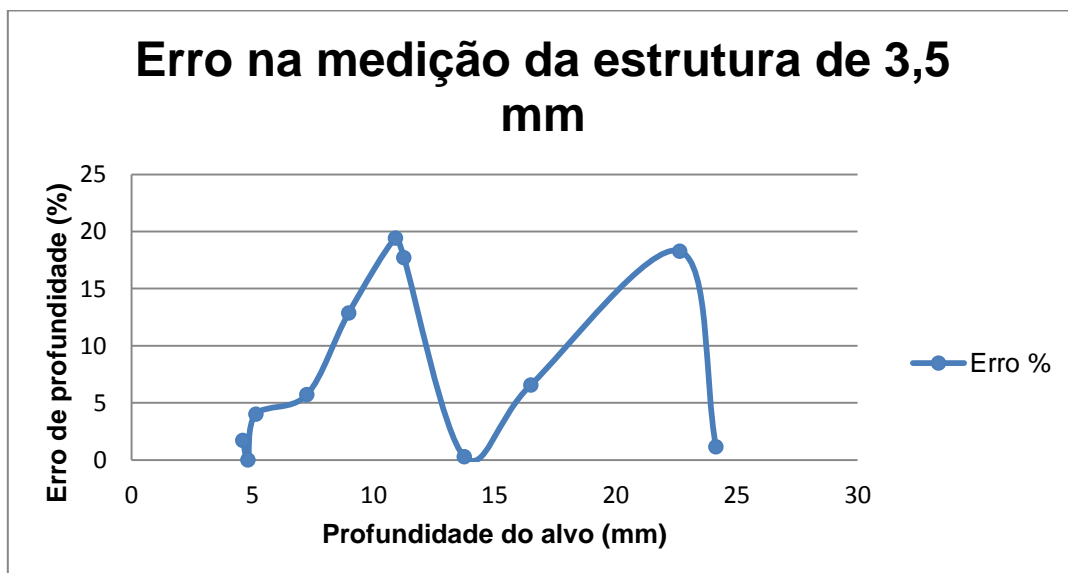


Figura 5.39 Erro na medição de uma estrutura de 3,5mm a diferentes profundidades.

Verificou-se que neste caso na medição da estrutura o erro máximo foi 20 %, o que corresponde a erros até 0,7 mm relativamente à medição da estrutura com as dimensões de 3,5 mm.

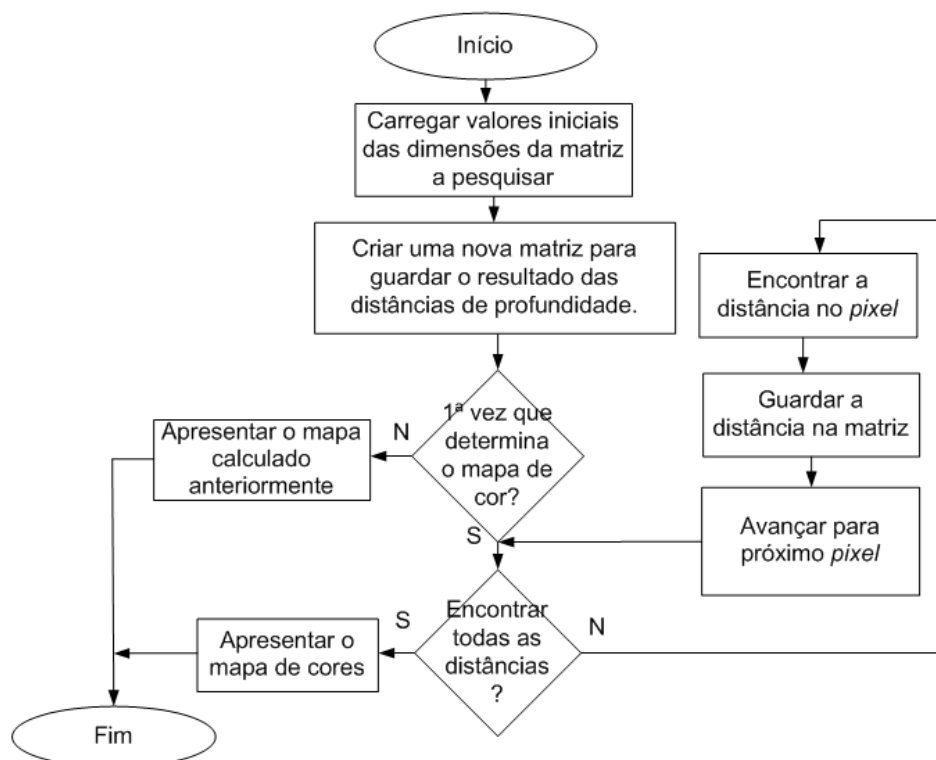
Os erros estão relacionados com a configuração da câmara que apresentava sensibilidades e ganhos diferentes nos dois sensores das câmaras, fazendo com que a correlação do ponto sobre o alvo estivesse sujeita a erros na sincronização dos pontos sobre o alvo nas medições das profundidades, conforme verificado anteriormente.

## 5.6 Mapa de cores com as profundidades

O mapa de cores com todas as profundidades permitirá ter a noção do comportamento dos cálculos de profundidades para todos os pontos sobre o alvo.

O mapa de cores foi criado percorrendo toda a matriz da imagem da esquerda, linha e coluna, de forma a encontrar a profundidade correspondente para cada *pixel*. As profundidades foram guardadas numa nova matriz, que posteriormente foi representada com um mapa de cores dependendo da distância, que variava de 2 a 26mm, correspondendo à gama de valores em que o algoritmo opera. Quanto às profundidades que não foi possível calcular através deste algoritmo foram consideradas com o valor 0 mm ou seja, em:  $\text{profundidade} < 2 \text{ mm} \wedge 26 \text{ mm} < \text{profundidade}$ .

Criou-se o Fluxograma 5.6, para compreender como foi elaborado o algoritmo



Fluxograma 5.6 Mapa de cores com todas as profundidades.

Para representação no *user interface* colocou-se na imagem da esquerda uma imagem com o alvo e na imagem da direita o mapa de cores com as

profundidades, de modo a comparar as imagens do alvo e todas as profundidades encontradas, conforme representado na Figura 5.40.

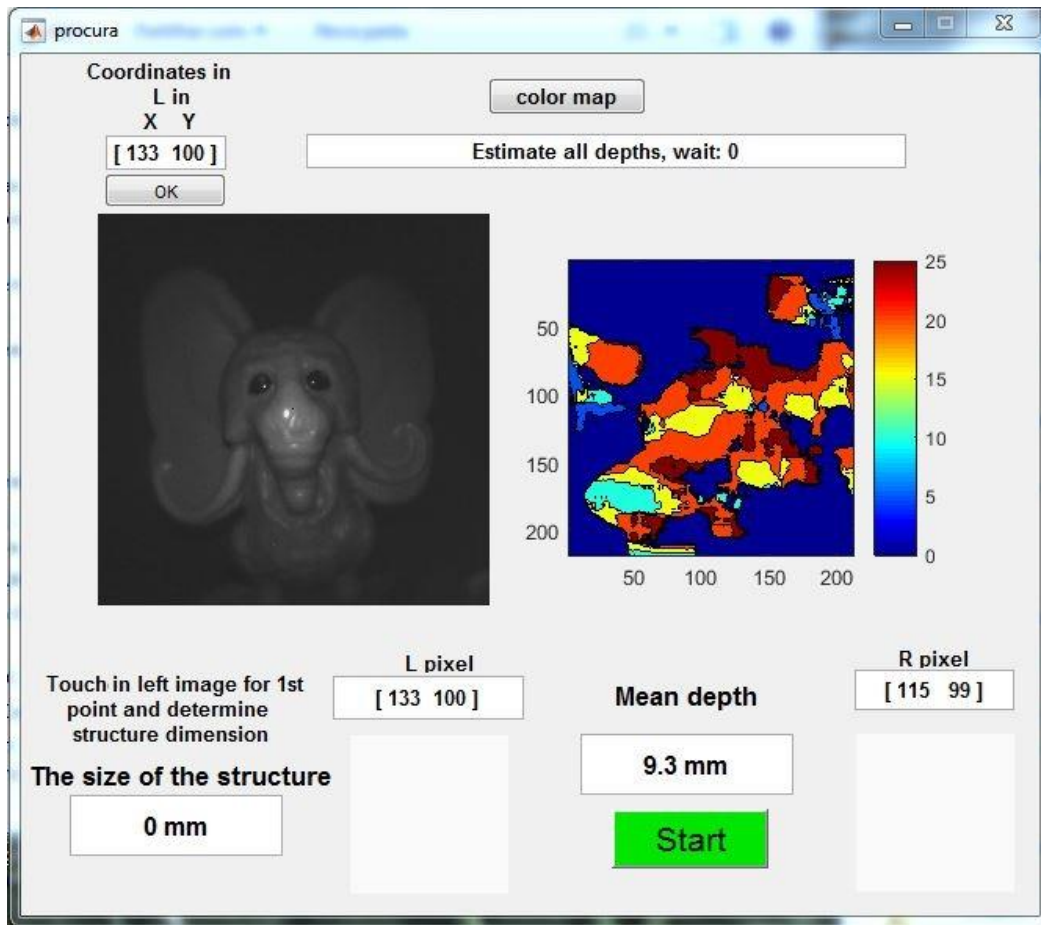


Figura 5.40 *User interface* com o mapa de cores, com todas as profundidades.

No mapa de cores foi possível observar, que no centro do mapa de cores a cor amarela encontrava-se o nariz do boneco, a sua volta vai aumentando a profundidade a cor vermelha, e nas laterais a cor azul com valor zero porque nessas regiões as profundidades são superiores a 26mm, encontravam-se fora da escala em que este algoritmo opera.

Deste modo, foi possível ter uma noção geral do mapa das profundidades com base nas imagens *stereo*, relativamente ao espaço tridimensional.

## 5.7 Conclusões

Grande parte do sucesso dos cálculos de profundidades e de distâncias, foi atribuído ao trabalho desenvolvido neste capítulo, nomeadamente aos algoritmos de melhoria da qualidade da imagem e ao estudo do cálculo com base na média temporal.

Foi relevante melhorar a qualidade das imagens *stereo*, porque desta forma aumentou-se a probabilidade de uma correta correlação dos pontos sobre os

alvos, conforme foi verificado após a aplicação dos algoritmos de *offset* na matriz RGB e do aumento de contraste.

O cálculo da profundidade realizado, com base na média de várias medições, veio melhorar a precisão de cálculo, tendo em conta que podem surgir alguns erros na sincronização dos pontos sobre os alvos nas imagens. Deste modo, com várias medições foi possível minimizar eventuais falhas.

Relativamente às lentes, estas provocam distorção nas imagens pelo que, a distorção nas imagens aumenta progressivamente à medida que se afasta do centro da imagem. Através do estudo do seu comportamento foi possível corrigir a distorção provocada pela lente.

Finalmente, foi possível realizar a medição de estruturas, sendo este o principal objetivo de todo este projeto. Só foi possível ser concretizada esta fase, após terem sido realizadas as diversas correções anteriores.

Por fim, foi criado um mapa de cores com base nas medições das profundidades encontradas em toda a imagem *stereo*, que permitiu verificar o comportamento do algoritmo do cálculo de profundidade de uma forma geral.

## 6. Sistema final

Neste capítulo será apresentado o sistema final, em que constam todos os conceitos apresentados anteriormente.

Quanto ao modo de funcionamento geral, existem dois sistemas distintos, designadamente o sistema que opera o sensor NanEye desenvolvido pelo fabricante e o sistema desenvolvido neste projeto, através da plataforma de desenvolvimento MATLAB<sup>®</sup>, que estima profundidades e distâncias com base na análise de imagens *stereo* captadas pelo primeiro sistema.

O *software* que opera o sensor NanEye *stereo* é o Awaiba Viewer, que capta imagens *stereo* em sequências de 7 *frames* consecutivas, seguindo-se um tempo de espera até à nova sequência de *frames*, atuando deste modo em ciclos.

O projeto desenvolvido em MATLAB<sup>®</sup> sobre o *user interface*, usa um processo sequencial de determinação de distâncias composto por quatro estados:

**1º Estado – Profundidade com coordenadas** – Este estado calcula a profundidade de um determinado ponto sobre o alvo, através da introdução de coordenadas, sendo que as coordenadas de referência correspondem à imagem *stereo* da esquerda.

**2º Estado – Profundidades automáticas** – Opera de forma cíclica, calculando a profundidade do ponto sobre o alvo selecionando na imagem da esquerda, na região com o maior nível de contraste, em três linhas predefinidas (linha: 111, 125 e 142). Este estado inicia-se após ser pressionado o botão de *Start* e é desativado após o mesmo botão ser pressionado novamente.

**3º Estado – Medição de estruturas** – Ao selecionar com o rato as coordenadas sobre a imagem da esquerda em duas posições diferentes, o sistema devolve a distância entre os dois pontos sobre os alvos, tendo em conta a profundidade.

**4º Estado – Mapa de distâncias** – Este modo permite calcular as profundidades em toda a imagem e posteriormente apresentá-las num mapa de cores, diferenciando as profundidades por cores. Este estado é ativado pressionando o botão *color map*, seguindo-se uma contagem decrescente até ser apresentado o mapa de cores.

O projeto criado apenas carrega as imagens no estado de profundidade automático, sendo que os restantes estados utilizam as últimas sequências de sete *frames* guardadas, de forma a que possam ser efetuadas diversas medições sobre um determinado alvo.

Segue-se a Figura 6.1, com o último *user interface* de suporte a todos os estados anteriormente descritos.

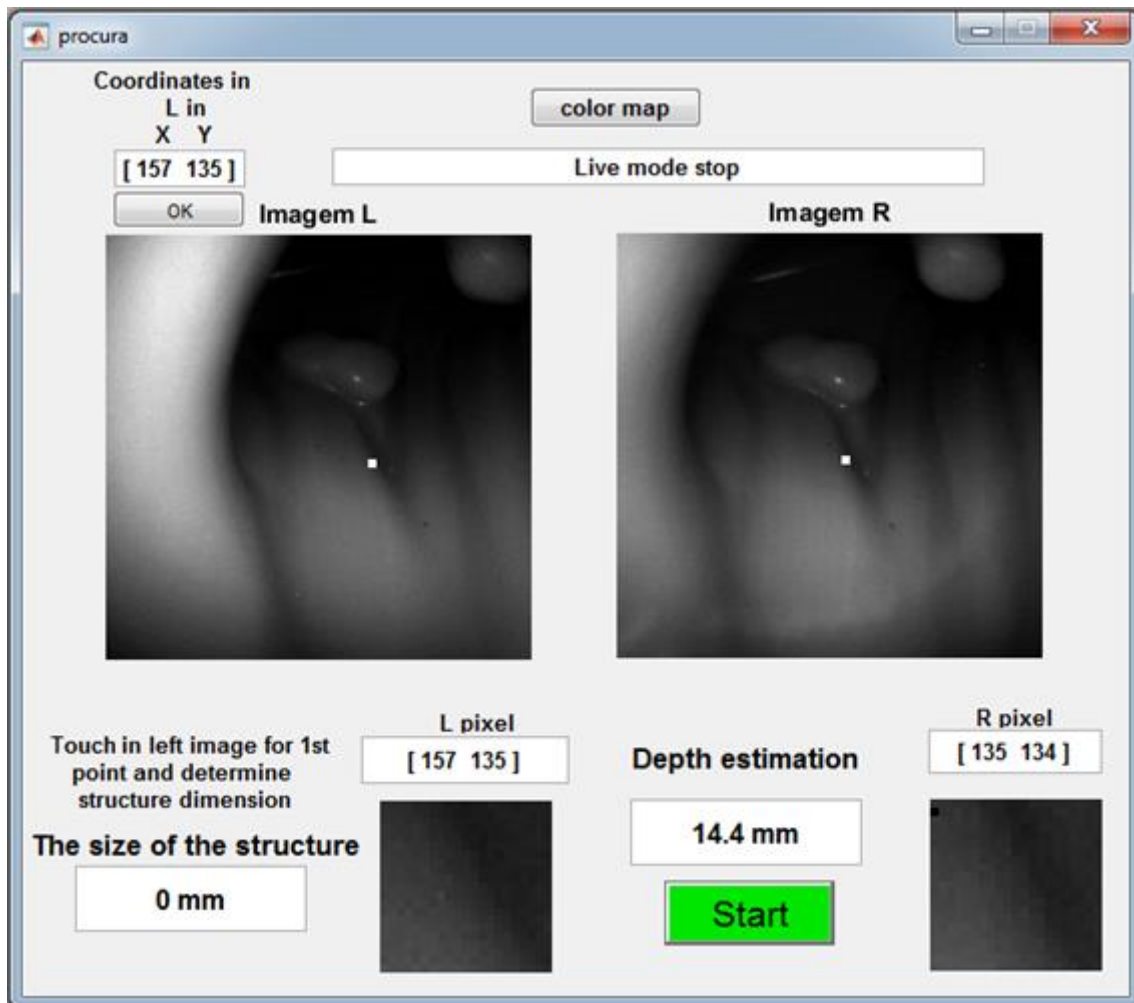


Figura 6.1 *User interface* final do projeto..

Com base nas características do sensor NanEye e nos estudos anteriores foi possível efetuar cálculos de profundidade entre 2 mm até 26 mm.

## 7. Conclusão e perspectivas de trabalho futuro

Neste capítulo serão apresentadas as conclusões gerais referentes ao projeto no âmbito do mestrado.

### 7.1 Conclusão geral

Conclui-se que foi possível criar um sistema capaz de efetuar a medição de profundidades e distâncias com sucesso, demonstrado ao longo da criação do projeto até ao sistema final.

Inicialmente, com o estudo prévio foi, possível encontrar uma equação simples e eficaz que permitiu calcular profundidades com base nas coordenadas do ponto sobre o alvo sobre as imagens *stereo*.

Foi necessário ir mais além, do que proposto inicialmente, com a criação de diversos algoritmos para a melhoria da qualidade de imagem.

Verificou-se uma evolução nos cálculos de profundidades à medida que foram sendo realizadas as diversas correções, no entanto os cálculos ainda apresentam alguns erros principalmente nas imagens com padrões uniformes em regiões ou em toda a imagem.

A forma encontrada para aumentar a variação no padrão das imagens foi a introdução de um projetor de linhas verticais junto à câmara, incidindo sobre o alvo de captura das imagens *stereo* e, desta forma, aumentar a variação do padrão da imagem.

Como este projeto foi direcionado para a câmara NanEye *Stereo*, dadas as suas características, de pequenas dimensões, foi possível criar um sistema que devolvesse profundidades entre 2 a 26mm.

Neste projeto foram encontradas diversas dificuldades para se obterem os resultados desejados. Para ultrapassar essas dificuldades, estudaram eventuais falhas, criando algoritmos que conseguissem prever e corrigir de forma autónoma. O resultado final do sistema foi satisfatório, dada a complexidade do tema deste projeto.

Acredita-se que esta foi apenas uma abordagem, e que existam outras eventuais soluções, que podem ser acrescentadas no futuro a este projeto.

### 7.2 Trabalhos futuros

Apesar de este algoritmo conseguir efetuar medições, acredita-se que existam algumas soluções para melhorar a eficácia das mesmas, tendo em conta a complexidade do tema. Deste modo serão de seguida apresentadas possíveis

soluções que possam vir a ser estudadas, de forma a contribuir para uma melhor precisão das medições.

Quanto ao *user interface*, seria vantajoso criar a opção de guardar ou imprimir um determinado alvo para posterior análise.

Adicionalmente, poderia ser importante alterar o projetor de linhas para apenas uma linha, de forma a diminuir as ambiguidades do sistema.

É também aconselhável que os sensores da câmara *stereo* sejam selecionados de tal forma que tenham a mesma sensibilidade e o mesmo ganho, para que sejam aplicadas as mesmas configurações em ambos os sensores.

Além disso, é preciso continuar a apostar na melhoria do método de pesquisa do padrão na segunda imagem.

Por último, importa ainda criar novas formas para a medição de estruturas, como por exemplo a medição de áreas ou volumes de objetos.

## Referências

- [1] AMS Sensores de Portugal, "[http://www.cmosis.com/products/standard\\_products/](http://www.cmosis.com/products/standard_products/)", Fevereiro de 2017.
- [2] (s.d.). Stereolabs, Inc; STEREO LABS. "<https://www.stereolabs.com>", Janeiro de 2017.
- [3] Xtion Pro Live, Asus, "[https://www.asus.com/us/3D-Sensor/Xtion\\_PRO\\_LIVE/](https://www.asus.com/us/3D-Sensor/Xtion_PRO_LIVE/)", Janeiro de 2017.
- [4] AMS Sensores de Portugal, "product – NANEYE STEREO", [http://www.cmosis.com/products/product\\_detail/NanEye\\_stereo](http://www.cmosis.com/products/product_detail/NanEye_stereo), Janeiro de 2017
- [5] Renata, Sales, "Achados da acuidade visual estática e dinâmica em pacientes com disfunção vestibular", Tese de Doutorado, Faculdade de Medicina de Ribeirão Preto/UPS, Janeiro de 2013.
- [6] Seeley Stephens Tate, "Anatomia & Fisiologia", 6ed, Janeiro de 2005.
- [7] Eric R.Fossum "A Review of the Pinned Photodiode for CCD and CMOS Image Sensors", IEEE journal of the electron devices society, vol. 2, no. 3, Maio de 2014.
- [8] A. El Gamal and H. Eltoukhy, "CMOS Image Sensors," IEEE Circuits Devices Mag., junho de 2005.
- [9] RED®, fabricante de câmaras digitais, <http://www.red.com/learn/red-101/bayer-sensor-strategy>, Janeiro de 2017.
- [10] Eugene Hecht, "ÓPTICA", F.C. Gulbenkian, Setembro de 1991.
- [11] Mário Ferreira, "Óptica e fotónica", 2ed, LIDEL, Abril de 2003.
- [12] Brasil escola, Lentes, <https://brasilescola.uol.com.br/fisica/lentes-1.htm>, Janeiro de 2017
- [13] Luís, Gomes,. "Cadeira Comunicações Óticas", Dezembro de 2016.
- [14] McGraw-Hill, Frederick J. Bueche, Eugene Hecht, "Schaun's outlines", 9ed., Janeiro de 2001
- [15] Alunos online, por Domiciano Silva, <http://alunosonline.uol.com.br/fisica/focos-uma-lente-esferica.html>, janeiro de 2017.
- [16] Edwin, Tjandranegara, "Distance Estimation Algorithm for Stereo Pair Images", ECE Technical Reports, Paper 64, <http://docs.lib.purdue.edu/ecetr/64>, Janeiro de 2005.
- [17] Helayel PE, Conceição DB, Meurer G, Swarovsky C, Oliveira Filho GR "Avaliação da Profundidade do Espaço Peridural com o Uso do Ultrassom", Revista Brasileira de Anestesiologia Vol. 60, nº4, Julho-Agosto de 2010.
- [18] M. S. Meneses, A. V. Cruz "Estereoscopia Aplicada À Neuroanatomia", Artigo em SciELO Arq. Neuropsiquiatr 2002;60(3-B):769-774, Maio de 2002.
- [19] RM Sousa, M Wány, P Santos, M Dias, "Multi-camera synchronization core implemented on USB3 based FPGA platform", Image Sensors and Imaging Systems 2015.
- [20] R Sousa, M Wány, Santos, F Morgado-Dias NanEye – "An Endoscopy Sensor with 3D Image Synchronization", IEEE Sensors, Fevereiro de 2016.
- [21] Ricardo M. Sousa, Martin Waeny, Pedro Santos, Morgado-Dias, "Image synchronization for 3D application using the NanEye sensor", Electronic Imaging, Photonics West, SPIE, Março de 2016.

- [22] G.R.P. Esteves, "Estereoscopia no cálculo de distância e controle de plataforma robótica", Monografia apresentada como requisito parcial para obtenção do diploma de Bacharel em Engenharia Eletrônica pela Escola Politécnica de Pernambuco - Universidade de Pernambuco; Janeiro de 2011.
- [23] Jernej Mrovlje and Damir Vrančić "Distance measuring based on stereoscopic pictures", 9th International PhD workshop on systems and control: young Generation Viewpoint, Outubro de 2008.
- [24] S. S. Mostafa, L. N. Sousa, N.F. Ferreira, R. M. Sousa, J. Santos, F. Morgado-Dias, Martin Waeny, Image Sensors and Imaging Systems "FPGA Implementation of Gamma Correction using a Piecewise Linear Approach for a Small Size Endoscopic Camera", San Francisco, Fevereiro de 2016.
- [25] MATLAB®, <https://www.mathworks.com/discovery/matlab-gui.html>, Janeiro de 2017.
- [26] Datasheet Lumileds, <https://www.lumileds.com/uploads/415/DS105-pdf>, Janeiro de 2017.
- [27] Datasheet Everstars, SMD-B [https://www.mouser.com/ds/2/143/16-219A-T2D-AR2T1QY-3T\\_datasheet-31510.pdf](https://www.mouser.com/ds/2/143/16-219A-T2D-AR2T1QY-3T_datasheet-31510.pdf), Janeiro de 2017.
- [28] RM. Sousa, M. Wány, P. Santos, F. Morgado-Dias, "Advanced illumination control algorithm for medical endoscopy applications", SPIE Sensing Technology Applications, Maio de 2016.
- [29] Gergely vass, Tamás Perlaki, "Applying and removing lens distortion in post production", tese da University of Technology and Economics, Budapest, Agosto de 2002
- [30] Ricardo M. Sousa, Martin Wány, Pedro Santos, Morgado-Dias, "NanEye-An Endoscopy Sensor with 3D Image Synchronization", IEEE Sensors de 2016.