

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

ANDREY AUGUSTO ALVES DE OLIVEIRA

MODELAGEM TRIDIMENSIONAL DE SUPERFÍCIES UTILIZANDO
IMAGEM TOF - ESTUDO COM A CÂMARA PMD CAMCUBE 2.0

CURITIBA

2011

ANDREY AUGUSTO ALVES DE OLIVEIRA

MODELAGEM TRIDIMENSIONAL DE SUPERFÍCIES UTILIZANDO
IMAGEM TOF - ESTUDO COM A CÂMARA PMD CAMCUBE 2.0

Dissertação apresentada ao Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas, Departamento de Geomática, Setor de Ciências da Terra, Universidade Federal do Paraná, como requisito final para obtenção do grau de Mestre em Ciências Geodésicas.

Orientador:
Prof. Dr. Jorge Antonio Silva Centeno.

CURITIBA

2011

O48 Oliveira, Andrey Augusto Alves de
Modelagem tridimensional de superfícies utilizando imagem TOF:
estudo com a câmara PMD CamCube 2.0 / Andrey Augusto Alves de
Oliveira – Curitiba, 2011.
127f. : il., tabs.

Impresso.

Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Paraná, Setor de
Ciências da Terra, Programa de Pós-Graduação em Ciências
Geodésicas.

Orientador: Jorge Antonio Silva Centeno.

1. Imagem tridimensional. 2. Fotogrametria. 3. Projeção ortogonal. I.
Centeno, Jorge Antonio Silva. II. Título.

526.982

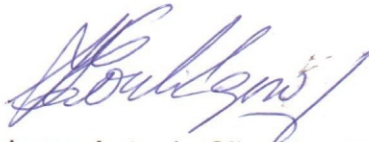
CDD:

TERMO DE APROVAÇÃO

ANDREY AUGUSTO ALVES DE OLIVEIRA

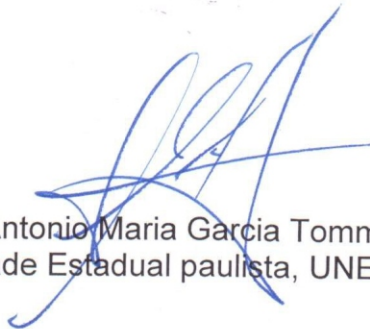
*“MODELAGEM TRIDIMENSIONAL DE SUPERFÍCIES UTILIZANDO
IMAGEM TOF - ESTUDO COM A CÂMARA PMD CAMCUBE 2.0”*

Dissertação nº 242 aprovada como requisito parcial do grau de Mestre no Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas, Setor de Ciências da Terra da Universidade Federal do Paraná, pela seguinte banca examinadora:



Orientador:

Prof. Dr. Jorge Antonio Silva Centeno
Departamento de Geomática, UFPR



Prof. Dr. Antonio Maria Garcia Tommaselli
Universidade Estadual paulista, UNESP



Prof. Dr. Hideo Araki
Departamento de Geomática, UFPR

Curitiba, 28 de fevereiro de 2011.

*À minha família, em especial meus pais,
Dedico este trabalho.*

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais, familiares, namorada e amigos pelo apoio, incentivo e companheirismo.

Ao Prof. Dr. Jorge Antonio Silva Centeno pela orientação e confiança.

Aos Professores, amigos e colegas do Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas e do Curso de Engenharia Cartográfica da Universidade Federal do Paraná pelos momentos compartilhados.

Aos colaboradores da UFPR que com seu trabalho e dedicação fazem a Universidade funcionar.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo fomento.

Ao instituto de Fotogrametria e Sensoriamento Remoto da Universidade de Karlsruhe (KIT – *Karlsruhe Institute of Technology*) pela cooperação e empréstimo da câmara PMD CamCube 2.0 utilizada para obter as imagens TOF analisadas neste trabalho. Ao Prof. Dr. Jorge A. S. Centeno pela captação das imagens na Alemanha no início do ano 2010 e a Fabiana Castro pela aquisição de novas imagens TOF.

Aos componentes da banca avaliadora Prof. Dr. Antonio Maria Garcia Tommaselli e Prof. Dr. Hideo Araki que contribuíram com importantes observações para a melhora deste trabalho de pesquisa.

Muito Obrigado.

RESUMO

Neste trabalho estudou-se a modelagem tridimensional de superfícies utilizando imagens TOF (*Time-Of-Flight*), para isto avaliou-se a qualidade dos dados obtidos com a câmara PMD[vision][®]CamCube 2.0. Este equipamento calcula a distância de objetos em relação ao seu sensor utilizando o princípio TOF. Com o objetivo de corrigir a geometria dos dados contidos na imagem foram calculados Parâmetros de Orientação Interior (POI) através do processo de calibração da câmara. Estes parâmetros definem a geometria interior do sistema de lentes e permitem fazer as correções geométricas necessárias. Outro fator que influenciou na qualidade dos dados foi à presença de ruído em função da iluminação, que pode ser controlada variando o tempo de integração na aquisição das imagens. Duas opções para a redução do ruído foram analisadas: filtragem no domínio espacial e no tempo de integração. Experimentos com os filtros passa-baixas pela média e mediana foram realizados a fim de reduzir o ruído no domínio espacial. Com a mesma finalidade, a média para cada tempo de integração foi calculada a partir de uma série de cinco imagens tomadas com o mesmo ponto de vista. A partir destes experimentos foi determinado o melhor tempo de integração para a aquisição da imagem. A etapa seguinte consistiu na segmentação da imagem para identificar superfícies do objeto de estudo. Em uma primeira abordagem aplicou-se o método de crescimento de regiões utilizando a distância do ponto ao plano como critério de similaridade. A segunda abordagem utilizou o cálculo de autovalores locais para gerar uma nova imagem, onde as bordas dos objetos foram evidenciadas. Esta nova imagem foi segmentada para obter superfícies de interesse do objeto através do algoritmo de deslocamento pela média. A partir do arquivo com as distâncias da imagem TOF e dos POI, píxeis da imagem segmentada foram projetados ortogonalmente, gerando uma nuvem de pontos com coordenadas 3D. Com isto, as dimensões de arestas do objeto foram comparadas com medidas de referência, encontrando-se diferenças na ordem de 2 centímetros. Finalizando o estudo as superfícies do objeto foram modeladas tridimensionalmente.

Palavras-chave: Imagem TOF. Modelagem tridimensional de superfícies. Calibração de câmaras. Análise de ruído. Autovalores. Autovetores. Projeção Ortogonal. Segmentação. Crescimento de regiões em nuvem de pontos 3D. Algoritmo de deslocamento pela média.

ABSTRACT

This work aims at studying the quality of 3D data obtained with a range camera, the PMD[vision][®]CamCube 2.0, and assessing its potential to model object surfaces. The equipment computes the distance to the objects using the Time-Of-Flight (TOF) principle. Initially, the equipment was calibrated using camera calibration methods. The Interior Orientation Parameters (IOP) allow reducing geometric distortion in the images. Another factor that influences the quality of data is the presence of noise caused by illumination conditions, which can be controlled by varying the integration time of the light source. Two options to reduce noise were analyzed: spatial filtering, with low-pass and median filter, and computing the average of a series of images taken from the same point of view. After determining the best integration time and Interior Orientation Parameters, the 3D coordinates of a point cloud was computed. The next step consists in image segmentation to identify the surfaces of an object. In a first approach it is applied a region growing method using the point-plane distance as similarity parameter. The second approach is based on the calculation of local eigenvalues, using small moving windows, to generate a new image where borders are highlighted. This new image is segmented using the mean-shift approach to delineate the surfaces of interest. Each interest pixel of the segmented image was projected for the 3D points cloud. The dimensions of the object are compared with real values. The comparison showed differences around 2cm, within the expected range. Finally the object surfaces can then be modeled with the 3D points cloud.

Keywords: TOF image. Range image. Three-dimensional modeling surfaces. Camera calibration. Noise analysis. Eigenvalues. Eigenvectors. Orthogonal projection. Segmentation. Region growing in 3D point clouds. Mean Shift Algorithm.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 2.1 – Princípio TOF	19
FIGURA 2.2 – Método da diferença de fase.....	20
FIGURA 2.3 – FC utilizada no método da diferença de fase.....	23
FIGURA 2.4 – Informação das imagens TOF.....	25
FIGURA 2.5 – Imagem TOF obtida com câmara PMD	26
FIGURA 2.6 – Ruído na nuvem de pontos 3D proveniente de imagem TOF	27
FIGURA 2.7 – Princípio de funcionamento do sistema PMD	28
FIGURA 2.8 – Captação da carga do sinal em sensores CCD e CMOS	29
FIGURA 2.9 – Representação de campos de franja	30
FIGURA 2.10 – Princípio de armazenamento de cargas em sensores TOF	31
FIGURA 2.11 – Princípio de captação de cargas pelo sensor PMD	32
FIGURA 2.12 – Medida da diferença de fase do sinal recebido.....	33
FIGURA 2.13 – Medida de distância com a câmara PMD	35
FIGURA 2.14 – Câmara PMD CamCube 2.0	36
FIGURA 2.15 – Imagem captada com a câmara PMD CamCube 2.0.....	37
FIGURA 2.16 – Princípio de funcionamento do SBI.....	39
FIGURA 2.17 – Modelos de câmaras TOF	39
FIGURA 2.18 – Nuvem de pontos 3D gerada a partir de imagem TOF	44
FIGURA 2.19 – Colinearidade entre os pontos no espaço imagem e objeto	45
FIGURA 2.20 – Sistemas de coordenadas utilizados em imagens	47
FIGURA 2.21 – Filtro para a definição de bordas do objeto.....	51
FIGURA 2.22 – Geometria do filtro para a definição de bordas	52
FIGURA 2.23 – Autovetores em nuvem de pontos 3D de uma superfície plana.....	55
FIGURA 2.24 – Inclinações de superfícies determinadas por autovalores	59
FIGURA 2.25 – Imagem segmentada	66
FIGURA 4.1 – Processamento da imagem TOF	69
FIGURA 4.2 – Filtragem passa-baixas pela média	80
FIGURA 4.3 – Filtragem pela mediana	80
FIGURA 4.4 – Filtragem utilizando a média temporal	81
FIGURA 4.5 – Intensificação de bordas com autovalores.....	85
FIGURA 4.6 – Imagem com bordas intensificadas.....	85
FIGURA 5.1 – Imagens do gabarito utilizadas na calibração da câmara	87
FIGURA 5.2 – Orientação Exterior das fotografias para a calibração da câmara	88
FIGURA 5.3 – Direção das distorções nos pontos da imagem TOF	88

FIGURA 5.4 – Correção geométrica da imagem TOF.....	90
FIGURA 5.5 – Desvio padrão x TI, janelas 10x10.....	93
FIGURA 5.6 – Imagens para TI=500 μ s e d=1,30m.....	93
FIGURA 5.7 – Imagens para TI=2000 μ s e d=1,30m.....	94
FIGURA 5.8 – Imagens para TI=2500 μ s e d=1,30m.....	95
FIGURA 5.9 – Desvios padrão para distância x TI.....	96
FIGURA 5.10 – Desvios padrão para janelas com TI=2000 μ s, d=1,30m.....	97
FIGURA 5.11 – Janelas de 40x40 píxeis, TI=2000 μ s, d=1,30m.....	97
FIGURA 5.12 – Desvios padrão para janelas com TI=5000 μ s, d=1,30m.....	98
FIGURA 5.13 – Janelas de 40x40 píxeis, TI=5000 μ s, d=1,30m.....	98
FIGURA 5.14 – Desvios padrão para janelas com TI=2000 μ s, d=2,10m.....	99
FIGURA 5.15 – Janelas de 40x40 píxeis, TI=2000 μ s, d=2,10m.....	99
FIGURA 5.16 – Desvios padrão para janelas com TI=5000 μ s, d=2,10m.....	100
FIGURA 5.17 – Janelas de 40x40 píxeis, TI=5000 μ s, d=2,10m.....	100
FIGURA 5.18 – Desvios padrão para janelas com TI=7000 μ s, d=2,10m.....	101
FIGURA 5.19 – Janelas de 40x40 píxeis, TI=7000 μ s, d=2,10m.....	101
FIGURA 5.20 – Arquivo de intensidades da imagem TOF obtida do objeto.....	103
FIGURA 5.21 – Arquivo de distâncias da imagem TOF com geometria corrigida...	104
FIGURA 5.22 – Nuvem de pontos, vista frontal.....	104
FIGURA 5.23 – Nuvem de pontos, vista perspectiva 3D.....	105
FIGURA 5.24 – Pontos semente no arquivo de intensidades da imagem TOF.....	106
FIGURA 5.25 – Crescimento de regiões, vista frontal.....	107
FIGURA 5.26 – Crescimento de regiões, vista perspectiva 3D.....	107
FIGURA 5.27 – Imagem com bordas intensificadas gerada com λ_1	109
FIGURA 5.28 – Imagem com bordas intensificadas gerada com λ_2	109
FIGURA 5.29 – Imagem com bordas intensificadas gerada com λ_3	109
FIGURA 5.30 – Imagens de intensidade com as bordas do objeto intensificadas ..	110
FIGURA 5.31 – Imagem com bordas intensificadas segmentada.....	111
FIGURA 5.32 – Nuvem de pontos da imagem segmentada, vista frontal.....	112
FIGURA 5.33 – Nuvem de pontos da imagem segmentada, vista 3D.....	113
FIGURA 5.34 – Nuvem de pontos 3D segmentada.....	114
FIGURA 5.35 – Pontos 3D selecionados na nuvem.....	114
FIGURA 5.36 – Dimensões de referência do objeto de estudo.....	115
FIGURA 5.37 – Nuvem de pontos 3D das superfícies frontal e superior.....	117
FIGURA 5.38 – Modelagem tridimensional das superfícies frontal e superior.....	118

LISTA DE QUADROS E TABELAS

QUADRO 2.1 – Especificações técnicas da câmara PMD CamCube 2.0.....	37
QUADRO 2.2 – Especificações técnicas de câmaras TOF	40
QUADRO 2.3 – Propriedades de superfícies normais obtidas com autovalores.....	57
TABELA 5.1 – Parâmetros de Orientação Interior calculados.....	89
TABELA 5.2 – Coordenadas 3D dos pontos e medidas realizadas	116

LISTA DE SIGLAS

Sigla	Significado
AMISE	<i>Asymptotic Mean Integrated Square Error</i>
CCD	<i>Charge Coupled Device</i>
CMOS	<i>Complementary Metal Oxide Semiconductor</i>
CP	Centro Perspectivo
EDISON	<i>Edge Detection and Image SegmentatiON System</i>
FC	Função de Correlação
FPN	<i>Fixed Pattern Noise</i>
FPS	<i>Frames Per Second</i>
LASER	<i>Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation</i>
LED	<i>Light Emitting Diode</i>
MDE	Modelo Digital de Elevação
MVC	Matriz de Variâncias e Covariâncias
PMD	<i>Photonic Mixer Device</i>
POE	Parâmetros de Orientação Exterior
POI	Parâmetros de Orientação Interior
PP	Ponto Principal
SBI	<i>Supression of Background Illumination</i>
TI	Tempo de Integração
TOF	<i>Time-Of-Flight</i>

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	14
1.1 OBJETIVO GERAL	16
1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	16
1.3 JUSTIFICATIVA	17
1.4 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO	18
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	19
2.1 MEDIDA DE DISTÂNCIA COM O PRINCÍPIO TOF	19
2.2 IMAGEM TOF	25
2.3 TEMPO DE INTEGRAÇÃO	26
2.4 PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO DO SENSOR PMD	28
2.5 CÂMARAS PMD	34
2.5.1 Câmara PMD CamCube 2.0	36
2.5.2 Dispositivo SBI	38
2.5.3 Modelos de câmaras TOF	39
2.6 ERROS DE MEDIDA	40
2.6.1 Erros não-sistemáticos em câmaras TOF	41
2.6.2 Erros sistemáticos em câmaras TOF	41
2.7 PROJEÇÃO ORTOGONAL DOS PONTOS	45
2.8 REFINAMENTO DA NUVEM DE PONTOS 3D	50
2.9 ANÁLISE DE SUPERFÍCIES POR AUTOVALORES E AUTOVETORES	53
2.10 ANÁLISE DE SUPERFÍCIES POR MOMENTOS INVARIANTES	56
2.11 ALGORITMO DE DESLOCAMENTO PELA MÉDIA	60
3 MATERIAIS	67
4 MÉTODOS	68
4.1 CALIBRAÇÃO DA CÂMARA	69
4.2 ANÁLISE DA PRESENÇA DE RUÍDO	78
4.2.1 Filtragem passa-baixas pela média	79
4.2.2 Filtragem pela mediana	80
4.2.3 Filtragem com a média temporal	81
4.3 SEGMENTAÇÃO	82
4.3.1 Crescimento de regiões a partir de superfícies planas e ponto semente	82

4.3.2 Segmentação por análise da variação local de autovalores.....	84
4.3.3 Segmentação com o algoritmo de deslocamento pela média	86
5 RESULTADOS E DISCUSSÕES	87
5.1 CALIBRAÇÃO DA CÂMARA	87
5.2 EXPERIMENTO 1 – ANÁLISE DE RUÍDO 1: IMAGEM TOF INTEIRA	92
5.3 EXPERIMENTO 2 – ANÁLISE DE RUÍDO 2: JANELAS DE 40X40 PÍXEIS	96
5.4 EXPERIMENTO 3 – PROJEÇÃO ORTOGONAL DOS PONTOS	102
5.5 EXPERIMENTO 4 – SEGMENTAÇÃO 1: CRESCIMENTO DE REGIÕES	106
5.6 EXPERIMENTO 5 – SEGMENTAÇÃO 2: ANÁLISE COM AUTOVALORES ...	108
5.7 EXPERIMENTO 6 – ANÁLISE DAS MEDIDAS OBTIDAS	113
5.8 MODELAGEM DAS SUPERFÍCIES 3D	117
6 CONCLUSÕES, RECOMENDAÇÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS	119
6.1 CONCLUSÕES	119
6.2 RECOMENDAÇÕES	122
6.3 CONSIDERAÇÕES FINAIS	122
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	123

1 INTRODUÇÃO

A informação métrica para a representação espacial de objetos é uma necessidade para diferentes áreas de estudo. Algumas aplicações exigem que o processo de aquisição e representação gráfica desta informação seja realizado com rapidez e qualidade. Em Ciências Geodésicas a obtenção desta informação pode ser feita através de diversas maneiras, dentre elas citam-se os levantamentos de campo e as imagens obtidas por sensores remotos, exemplos são técnicas aplicadas em Topografia e Fotogrametria.

Com a Topografia o trabalho pode alcançar alto grau de exatidão dependendo da técnica e precisão do equipamento utilizado. No entanto, se gasta bastante tempo para realizar o levantamento das informações em campo e também para o processamento e organização dos dados em escritório. Algumas aplicações da Topografia estão na locação de obras como rodovias, geração de perfis de terrenos e rios, monitoramento de deformações na estrutura de barragens, pontes e também no levantamento de pontos 3D para representar fachadas de edifícios.

Com a Fotogrametria o levantamento das informações tridimensionais de um objeto pode ser feito em tempo relativamente curto. As fotografias são obtidas de forma instantânea. No entanto, quando se utilizam técnicas convencionais de Fotogrametria necessita-se de pelo menos duas fotografias com sobreposição das áreas imageadas para a geração do modelo fotogramétrico. Outra forma é a técnica conhecida por Monorestituição Digital, onde se utiliza uma fotografia digital em conjunto com um Modelo Digital de Elevação (MDE), normalmente gerado por uma nuvem de pontos proveniente de outro equipamento ou sensor (MITISHITA, 1997).

Na modalidade terrestre da Fotogrametria é possível determinar pontos 3D para representar fachadas de prédios, obras de arte, mapeamentos de ruas e imóveis com a plataforma em movimento, dentre outras aplicações.

Além das técnicas convencionais de levantamentos utilizadas em Topografia e Fotogrametria e com o objetivo de viabilizar a aquisição da informação espacial, equipamentos e técnicas têm sido constantemente desenvolvidos e aperfeiçoados. Avanços tecnológicos têm possibilitado a obtenção da informação tridimensional para a representação dos objetos de forma rápida e precisa. Exemplos são os sistemas de varredura *laser scanner* e as câmaras TOF (*Time-Of-Flight*), também

conhecidas na literatura por *Range Cameras*. Estas câmaras geram imagens com informações de distância para cada pixel do objeto imageado, denominadas imagens de profundidade, distância ou *Range Image*. Neste trabalho será utilizada preferencialmente a denominação “imagem TOF”.

Nas últimas décadas os sistemas de varredura *laser scanner* têm sido muito utilizados para mapeamento. Equipamentos com esta tecnologia possibilitam a obtenção de milhares de pontos por segundo e podem ser instalados em plataformas aéreas ou terrestres. No entanto, devido a este ser um equipamento óptico e mecânico, o alto custo na sua aquisição torna-o inviável para algumas aplicações.

Câmaras TOF atraem a atenção de diferentes áreas que necessitam de pontos com coordenadas 3D de seus objetos de estudo, tais como a Visão Computacional e a Engenharia de Automação. Um modelo de câmara TOF é a PMD CamCube 2.0, que capta 25 imagens por segundo (*Frames Per Secunde - FPS*). Com esta frequência de aquisição pode obter o movimento dos objetos na cena e de grande quantidade de informação tridimensional sobre os mesmos.

No entanto, a grande quantidade de dados captada deve ter sua qualidade avaliada. A iluminação exterior ao sistema interfere negativamente. Outro fator a ser observado é a configuração da cena, pois interferências são causadas pelas distâncias, orientações e refletividade das superfícies dos objetos em relação ao sensor da câmara. Em uma mesma cena podem-se apresentar medidas ambíguas de distância para os pontos devido a erros causados pela iluminação utilizada no sistema. As influencias causadas por erros sistemáticos assim como ruídos devem ser observadas para cada tipo de aplicação (MAY *et al.*, 2008).

A câmara TOF utilizada para a aquisição das imagens nesta pesquisa foi a PMD[vision][®]CamCube 2.0. Esta utiliza um sensor de imageamento PMD (*Photonic Mixer Device*), que possibilita armazenar informação de distância para os píxeis de uma imagem de intensidade. O equipamento fornece a imagem TOF, que é composta por um arquivo com as intensidades que o sinal retornou para o sensor, e um arquivo com as informações de distância para cada pixel, o que possibilita a percepção da profundidade dos objetos na cena.

1.1 OBJETIVO GERAL

O objetivo geral deste trabalho de pesquisa é desenvolver uma metodologia para a modelagem tridimensional das superfícies de objetos a partir da nuvem de pontos 3D proveniente da imagem TOF.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Realizar a correção geométrica dos dados da imagem TOF através de Parâmetros de Orientação Interior obtidos com o processo de calibração da câmara;
- Testar métodos de filtragem para a redução de ruído presente nas imagens TOF e analisar formas para a aquisição da imagem TOF com menor presença de ruído;
- Analisar o tempo de integração para diferentes situações de aquisição da imagem TOF;
- Avaliar métodos para a segmentação das superfícies de objetos a partir da imagem TOF;
- Gerar nuvem de pontos com coordenadas tridimensionais das superfícies segmentadas e modelar estas superfícies tridimensionalmente;
- Avaliar a qualidade das medidas obtidas com a modelagem tridimensional das superfícies do objeto de estudo.

1.3 JUSTIFICATIVA

Com o desenvolvimento e aperfeiçoamento das câmaras TOF, acredita-se na viabilização deste equipamento para a medida de distância e modelagem tridimensional das superfícies de objetos para diferentes finalidades. Apresenta as seguintes vantagens:

- Recobrimento da área de forma instantânea;
- Possibilidade de filmar a cena, registrando o movimento dos objetos com frequência de aquisição de 25 imagens por segundo;
- Fornece grande quantidade de pontos com coordenadas 3D dos objetos imageados;
- Uma imagem é suficiente para estimar a distância dos objetos;
- Informação na banda espectral do infravermelho.

Uma imagem TOF captada instantaneamente disponibiliza informação sobre a distância de objetos contidos na cena, sendo possível a geração de nuvens de pontos para a representação tridimensional de objetos, sem necessitar de informação proveniente de outro sensor. Outra vantagem é o sistema não precisar de iluminação exterior.

Algumas aplicações para as imagens TOF foram realizadas nas áreas de prevenção de acidentes automobilísticos e segurança de pedestres (RINGBECK, 2007); Visão Computacional (WIEDEMANN *et al.*, 2008); mapeamentos tridimensionais de objetos em ambientes fechados para a movimentação robótica (MAY *et al.*, 2008); Computação Gráfica (KOLB, 2009 *et al.*; KOCH *et al.*, 2009); realização de medidas do corpo humano para a indústria de roupas (APUZZO, 2009); e análise de deformações (JAMTSHO, 2010).

1.4 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

A presente dissertação foi estruturada em seis capítulos. No primeiro capítulo realiza-se a introdução ao tema, descreve-se o objetivo geral e os objetivos específicos, além da justificativa para a pesquisa.

O segundo capítulo apresenta uma revisão de conceitos sobre: medida de distância utilizando o princípio TOF; descrição da imagem TOF e seus arquivos de intensidades e distâncias; influencia do tempo de integração (TI) na aquisição da imagem TOF; princípio de funcionamento do sensor PMD; modelos de câmaras TOF; erros de medida que podem ocorrer utilizando estas câmaras; projeção ortogonal das distâncias obtidas com a imagem TOF para a geração da nuvem de pontos 3D; método para o refinamento da nuvem de pontos 3D; detecção de superfícies por autovetores e autovalores; análise de superfícies por momentos invariantes; e algoritmo de deslocamento pela média para a segmentação de imagens.

No terceiro capítulo descrevem-se os materiais, equipamentos e espaço físico utilizado para a realização do trabalho de pesquisa.

Com o quarto capítulo são descritos os métodos utilizados para o desenvolvimento da pesquisa; calibração da câmara; filtragens para análise e tratamento de ruído presente nas imagens; métodos de segmentação por crescimento de regiões na nuvem de pontos; segmentação por análise da variação local de autovalores no arquivo de distâncias da imagem TOF e geração de imagem de intensidade com as bordas do objeto intensificadas; segmentação da imagem com bordas intensificadas utilizando o algoritmo de deslocamento pela média.

Com o quinto capítulo descrevem-se os resultados obtidos, tais como: valores dos parâmetros calculados no processo de calibração da câmara; experimentos realizados para a análise da presença de ruído nas imagens TOF; projeção ortogonal dos pontos para a geração da nuvem de pontos 3D; segmentação por crescimento de regiões; segmentação por análise da variação local de autovalores; análise das medidas obtidas com a nuvem de pontos 3D segmentada; e também se realiza a modelagem tridimensional de duas superfícies do objeto estudado.

Finalmente, com o sexto capítulo são apresentadas conclusões, considerações finais e recomendações para trabalhos futuros, de acordo com os experimentos realizados.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 MEDIDA DE DISTÂNCIA COM O PRINCÍPIO TOF

O princípio TOF (*Time-Of-Flight*) permite calcular a distância de objetos a partir da emissão e recepção de um sinal luminoso. Com este objetivo utiliza-se um conjunto de emissor e receptor ópticos, que mede o tempo necessário para o sinal retornar para o sensor após atingir o alvo, com base no conhecimento do valor da velocidade da luz propagada no vácuo. De acordo com Baltsavias (1999), o cálculo da distância com o princípio TOF pode ser realizado através de dois métodos:

- Tempo de percurso de pulsos curtos de energia;
- Mudança de fase de um sinal modelado na forma de onda contínua.

Sistemas que utilizam o primeiro método de medida transmitem um pulso e medem o seu tempo de retorno. Isto é possível devido ao retardo de tempo gasto no percurso do sinal que é medido através de um ponto no pulso de retorno com referência no pulso emitido. Quanto melhor é a medida do tempo, melhor a distância calculada, sendo o relógio do sensor um fator de grande importância neste método. Para obter precisão métrica necessita-se realizar a medida de tempo em nano segundos (ns). O afastamento e duração do pulso também são fatores importantes na resolução da medida de distância com este método. A Figura 2.1 ilustra a medida de distância com o princípio TOF (LANGE, 2000).

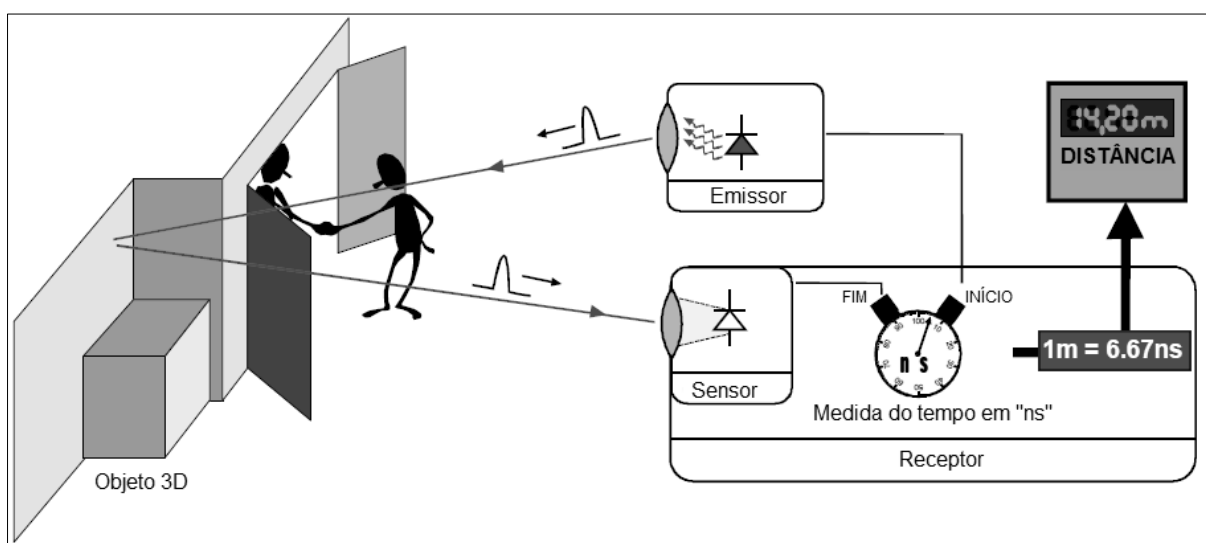


FIGURA 2.1 – Princípio TOF
FONTE: LANGE (2000)

Utilizando pulsos de uma fonte de luz pode-se calcular a distância de um alvo através da Equação (2.1).

$$D = \frac{c \cdot t}{2} \quad (2.1)$$

onde:

D – Distância entre o sensor e o alvo;

c – Valor constante da velocidade da luz;

t – Variação de tempo entre emissão e recepção do pulso.

O segundo método trabalha com a determinação da mudança de fase do sinal contido em uma onda contínua modulada. Pode ser utilizado para evitar o problema na medida de tempo com alta precisão. O sinal luminoso pode ser emitido utilizando fontes LED (*Light Emitting Diode*) ou LASER (*Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation*). Estas fontes permitem a modulação direta do sinal luminoso através da voltagem do sistema (LANGE, 2000).

Para a utilização do método da diferença de fase considera-se que o sinal refletido pelo alvo mantém a forma do sinal modulado emitido, mas a fase do sinal emitido é diferente da fase do sinal recebido, conforme ilustrado com a Figura 2.2.

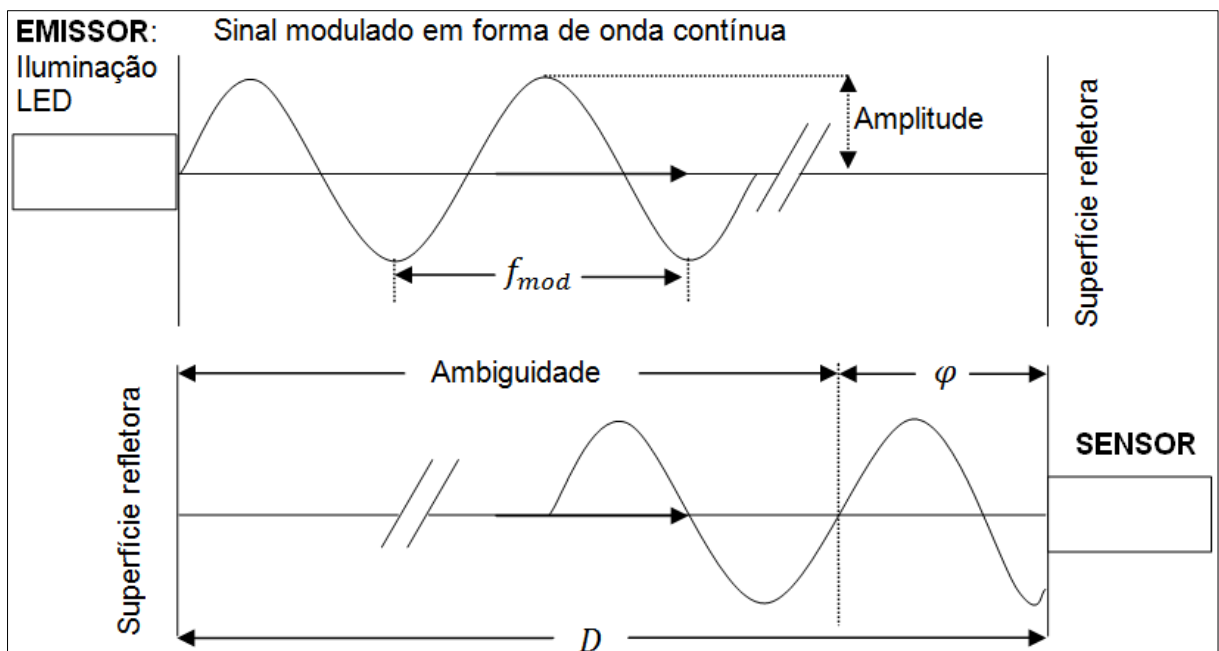


FIGURA 2.2 – Método da diferença de fase

Sendo assim, a mudança de fase entre os sinais pode ser utilizada para calcular a distância, conforme Equação (2.2).

$$D = \frac{\varphi \cdot c}{4 \cdot \pi \cdot \gamma} \quad (2.2)$$

onde:

D – Distância entre o sensor e o alvo;

φ – Diferença de fase entre o sinal emitido e o recebido;

c – Valor constante da velocidade da luz;

γ – Frequência de modulação do sinal.

Em câmaras TOF a distância entre o sensor e o alvo é medida utilizando o método da diferença de fase, com uma Função de Correlação (FC) entre o sinal emitido e o refletido. As amplitudes dos sinais são moduladas com a mesma frequência. Com isto, a iluminação pode ser feita utilizando díodos emissores de luz LED, tendo-se a vantagem que a FC pode ser obtida com o sensor PMD, a partir da forma senoidal do sinal recebido (RAPP, 2007).

A FC é calculada através do sinal emitido e recebido. Estes sinais são modelados matematicamente com forma senoidal, tendo em vista que sua propagação ocorre na forma de onda. Dado um sinal luminoso emitido $g(t)$ e um sinal recebido $s(t)$ em um ponto do sensor PMD, as amostras $c(\tau)$ podem ser calculadas através da Equação (2.3). Estas amostras são utilizadas para modelar a FC em um atraso de tempo τ .

$$c(\tau) = s(t) \otimes g(t) = \lim_{T \rightarrow \infty} \int_{-\frac{T}{2}}^{+\frac{T}{2}} s(t) \cdot g(t + \tau) dt \quad (2.3)$$

onde:

$s(t)$ – Função que modela a forma do sinal luminoso recebido;

$g(t)$ – Função que modela a forma do sinal luminoso emitido;

t – Variação de tempo entre a emissão e a recepção do sinal;

τ – Atraso de tempo no recebimento do sinal.

O sinal emitido pode ser expresso com $g(t) = \cos(\omega t)$, o recebido é expresso através da relação $s(t) = 1 + a \cdot \cos(\omega t - \varphi)$. Ambos com forma senoidal, amplitude a e diferença de fase φ . Com isto a FC pode ser apresentada na forma da Equação (2.5).

$$c(\tau) = [1 + a \cdot \cos(\omega\tau - \varphi)] \otimes [\cos(\omega\tau)] \quad (2.4)$$

$$c(\tau) = \lim_{T' \rightarrow \infty} \frac{1}{T'} \int_{-\frac{T'}{2}}^{+\frac{T'}{2}} [1 + a \cdot \cos(\omega t - \varphi)] \cdot [\cos(\omega t + \omega\tau)] dt \quad (2.5)$$

$$c(\tau) = \frac{a}{2} \cdot \cos(\varphi + \omega\tau) \quad (2.6)$$

onde:

$g(t)$ – Função senoidal que modela a forma do sinal emitido;

$s(t)$ – Função que modela a forma do sinal recebido;

t – Variação de tempo entre a emissão e recepção do sinal;

τ – Atraso no tempo de recebimento do sinal;

a – Amplitude da onda portadora do sinal;

φ – Diferença de fase;

ω – Referência de fase para o sinal modelado na forma senoidal.

Lange (2000) avaliou a FC para fases ωt pré-definidas, escolhendo quatro fases: $\omega t = 0^\circ$; $\omega t = 90^\circ$; $\omega t = 180^\circ$; $\omega t = 270^\circ$. Verificou que é possível calcular a diferença de fase φ e a amplitude a do sinal recebido $s(t)$. Considerando que o sinal recebido tem sobreposição ao sinal emitido, deve-se adicionar uma constante de deslocamento K conforme a Equação (2.7).

$$C(\tau) = c(\tau) + K \quad (2.7)$$

$$C(\tau_0) = c(\tau_0) + K = \frac{a}{2} \cdot \cos(\varphi) + K \quad (2.8)$$

$$C(\tau_1) = c(\tau_1) + K = -\frac{a}{2} \cdot \sin(\varphi) + K \quad (2.9)$$

$$C(\tau_2) = c(\tau_2) + K = -\frac{a}{2} \cdot \cos(\varphi) + K \quad (2.10)$$

$$C(\tau_3) = c(\tau_3) + K = \frac{a}{2} \cdot \sin(\varphi) + K \quad (2.11)$$

Analisando a FC em quatro pontos, a diferença de fase φ e a amplitude a do sinal $s(t)$ podem ser calculadas através das Equações (2.12) e (2.13).

$$\varphi = \operatorname{tg}^{-1} \left(\frac{C(\tau_3) - C(\tau_1)}{C(\tau_0) - C(\tau_2)} \right) \quad (2.12)$$

$$a = \frac{\sqrt{[C(\tau_3) - C(\tau_1)]^2 + [C(\tau_0) - C(\tau_2)]^2}}{2} \quad (2.13)$$

Pode-se fazer a simplificação das Equações (2.14) à (2.17) para quatro pontos amostrais que são necessários na modelagem da FC.

$$C(\tau_1) = A_1 \quad (2.14)$$

$$C(\tau_2) = A_2 \quad (2.15)$$

$$C(\tau_3) = A_3 \quad (2.16)$$

$$C(\tau_0) = A_4 \quad (2.17)$$

A análise da FC entre o sinal óptico e elétrico recebido no dispositivo do sensor é feita utilizando a diferença de fase, conforme ilustrado com a Figura 2.3.

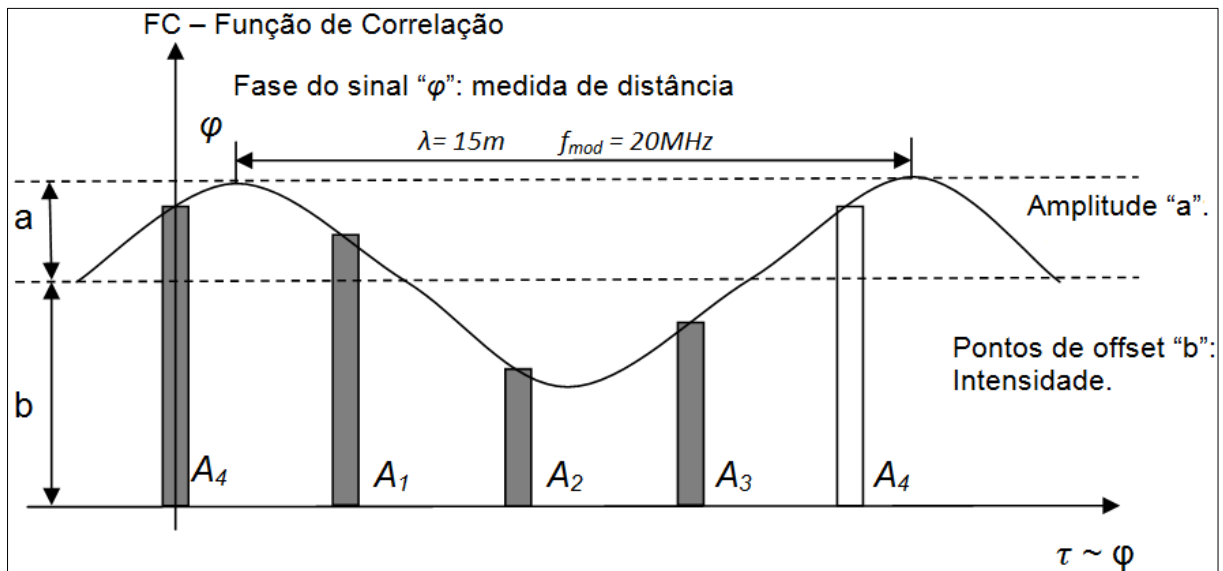


FIGURA 2.3 – FC utilizada no método da diferença de fase
 FONTE: Adaptado de LANGE (2000)

A FC permite calcular a distância entre o alvo e a câmara utilizando quatro amostras A_1, A_2, A_3 e A_4 com defasagem de 90° . A diferença de fase φ entre o sinal

emitido e o recebido é proporcional à distância entre o alvo e a câmara. O valor para a diferença de fase pode ser calculado através da Equação (2.18).

$$\varphi = \arctan\left(\frac{A_1 - A_3}{A_2 - A_4}\right) \quad (2.18)$$

onde:

φ – Diferença de fase entre a onda emitida e a recebida;

A_1, A_2, A_3, A_4 – Pontos amostrais utilizados na modelagem da FC.

Além do valor da diferença de fase entre os sinais, dois outros valores podem ser calculados, a amplitude a e o valor de intensidade b do sinal recebido, conforme as Equações (2.19) e (2.20), respectivamente.

$$a = \frac{\sqrt{(A_1 - A_3)^2 + (A_2 - A_4)^2}}{2} \quad (2.19)$$

$$b = \frac{A_1 + A_2 + A_3 + A_4}{4} \quad (2.20)$$

onde:

a – Amplitude do sinal recebido;

b – Intensidade do sinal recebido (*offset*).

A distância d do sensor ao alvo é calculada através da Equação (2.21).

$$d = \frac{c \cdot \varphi}{4\pi \cdot f_{mod}} \quad (2.21)$$

onde:

d – Distância entre o sensor e o alvo;

c – Valor constante da velocidade da luz propagada no vácuo;

φ – Diferença de fase entre o sinal emitido e o recebido;

f_{mod} – Frequência de modulação do sinal luminoso utilizado.

A frequência de modulação do sinal emitido estabelece a distância máxima que poderá ser medida para um determinado comprimento de onda. Em um sinal

modulado com a frequência $f_{mod} = 20MHz$ e comprimento de onda $\lambda_{mod} = 15m$, conforme a Equação (2.22) a distância máxima que poderá ser medida é de 7,5 metros (MÖLLER *et al.*, 2005).

$$d_{max} = \frac{\lambda_{mod}}{2} = 7,5m \quad (2.22)$$

2.2 IMAGEM TOF

Os píxeis da imagem TOF contêm informações de distância e intensidade das superfícies dos objetos. Proporcionam a análise da profundidade dos objetos na cena, além da informação de intensidade do sinal captado pelo sensor. A Figura 2.4 ilustra a informação 3D contida na imagem TOF.

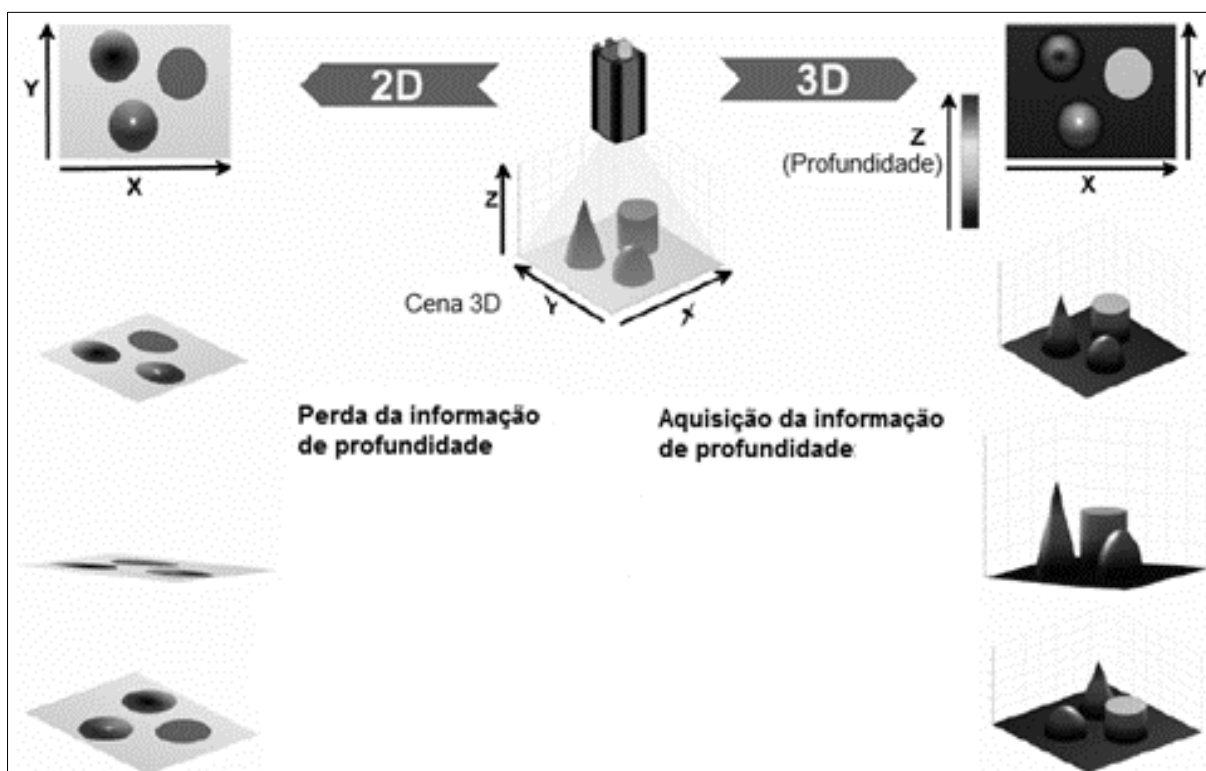


FIGURA 2.4 – Informação das imagens TOF
 FONTE: Adaptado de RINGBECK (2007)

Com a informação de profundidade e o posicionamento bidimensional dos objetos na imagem, pode-se realizar o mapeamento destes objetos e estimar suas dimensões. As câmaras TOF podem captar imagens e vídeos para realizar medidas e detectar movimentos. A Figura 2.5 ilustra os arquivos da imagem TOF.

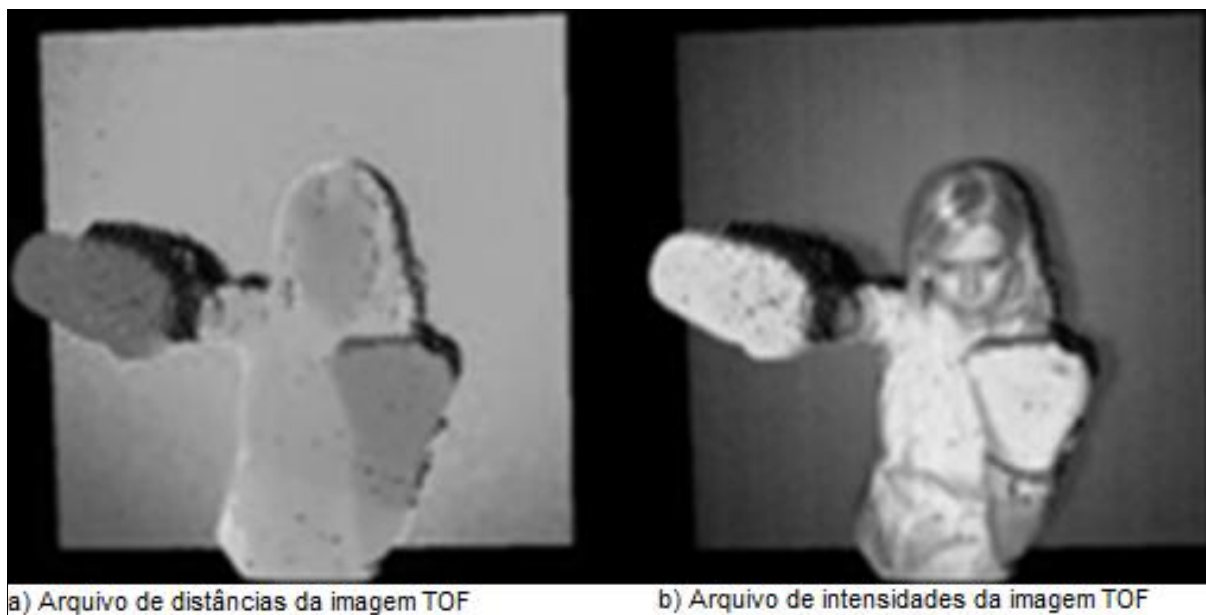


FIGURA 2.5 – Imagem TOF obtida com câmara PMD
FONTE: PMD Technologies (2009)

A Figura 2.5a ilustra o arquivo com informação das distâncias dos objetos presentes na imagem TOF. A Figura 2.5b ilustra o arquivo com as intensidades que o sinal retornou para o sensor, registrada em cada píxel da imagem infravermelha, captada com comprimento de onda de 870nm.

2.3 TEMPO DE INTEGRAÇÃO

O período de tempo que o sensor da câmara ficou exposto para obter a imagem é chamado de tempo de integração (TI). A quantidade de energia eletromagnética captada pelo sensor é diretamente influenciada por este tempo, pelas características refletivas das superfícies dos objetos e pelo meio em que a imagem foi tomada. Os elementos do sensor podem ser carregados de acordo com seu intervalo de capacidade, do insaturado ao supersaturado. Estes valores causam ruídos na imagem, variando de acordo com a distância entre o objeto e o sensor (CENTENO e JUTZI, 2010).

Este pode ser considerado o parâmetro interno mais crítico em uma câmara TOF, pois descreve o período de tempo que os elementos sensores necessitam para detectar o sinal luminoso com a finalidade de obter a diferença de fase utilizada

para o cálculo da distância. Quando o TI é muito baixo, alguns elementos do sensor podem não ser ativados, ocasionando píxeis com valor zero, não sendo possível calcular sua distância. Por outro lado, se o TI é muito elevado, o pixel pode ficar supersaturado, o que também causa erro na medida da distância. Sendo assim, é necessário determinar um TI específico para cada situação. Nas câmaras PMD o controle do TI é realizado através de *software*, em outros modelos de câmaras TOF este controle pode ser feito através de *hardware* (WIEDEMANN *et al.*, 2008).

A Figura 2.6 ilustra a presença de ruído na imagem TOF influenciada pelo TI. Nesta figura as nuvens de pontos 3D foram geradas com imagens TOF obtidas com a câmara PMD CamCube 2.0, a partir do mesmo ponto de vista, mas com diferentes TI (140 μ s, 1400 μ s e 14000 μ s), isto causou a presença de ruído com diferentes comportamentos.

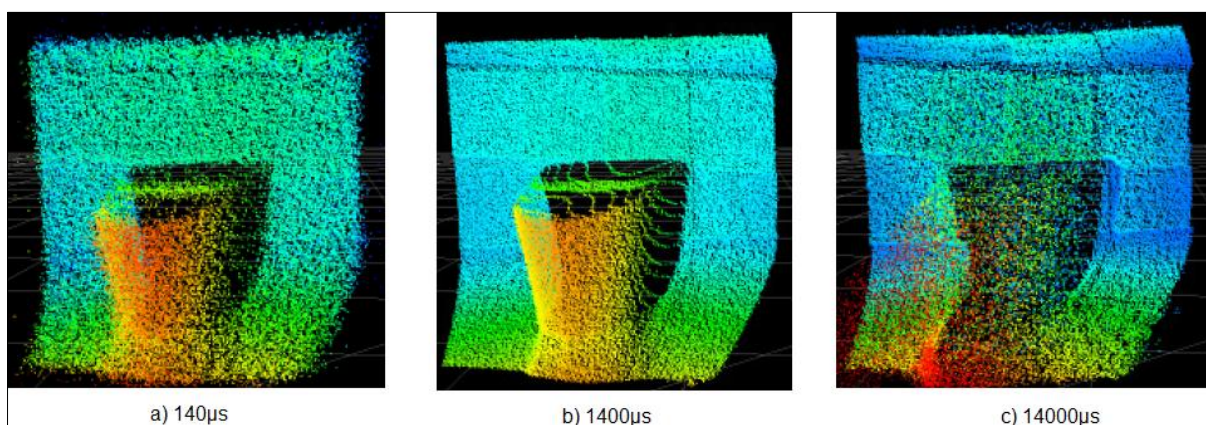


FIGURA 2.6 – Ruído na nuvem de pontos 3D proveniente de imagem TOF
FONTE: PMD CamCube Tutorial (2009)

A nuvem de pontos gerada com a imagem obtida com TI de 1400 μ s, ilustrada com a Figura 2.6b, foi a que melhor representou a forma das superfícies do objeto. A nuvem de pontos da Figura 2.6a foi gerada a partir da imagem obtida com TI igual a 140 μ s, considerada com baixa saturação, pois a intensidade do sinal captado pelo sensor foi pequena. A nuvem de pontos da Figura 2.6c foi gerada com imagem obtida com TI igual a 14000 μ s, o que causou a saturação do sinal recebido pelo sensor e maior presença de ruído. A nuvem de pontos apresentada com a Figura 2.6c apresentou-se menos consistente para representar as superfícies do objeto em questão.

2.4 PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO DO SENSOR PMD

O dispositivo PMD (*Photonic Mixer Device*) realiza medidas de distância utilizando o princípio TOF. Com este objetivo o dispositivo emite sinais luminosos com frequência modulada e o sensor capta a intensidade de retorno do sinal refletido pelo alvo. Informações sobre as fases e intensidades destes sinais são obtidas com o processamento. A Figura 2.7 ilustra as etapas deste processo.

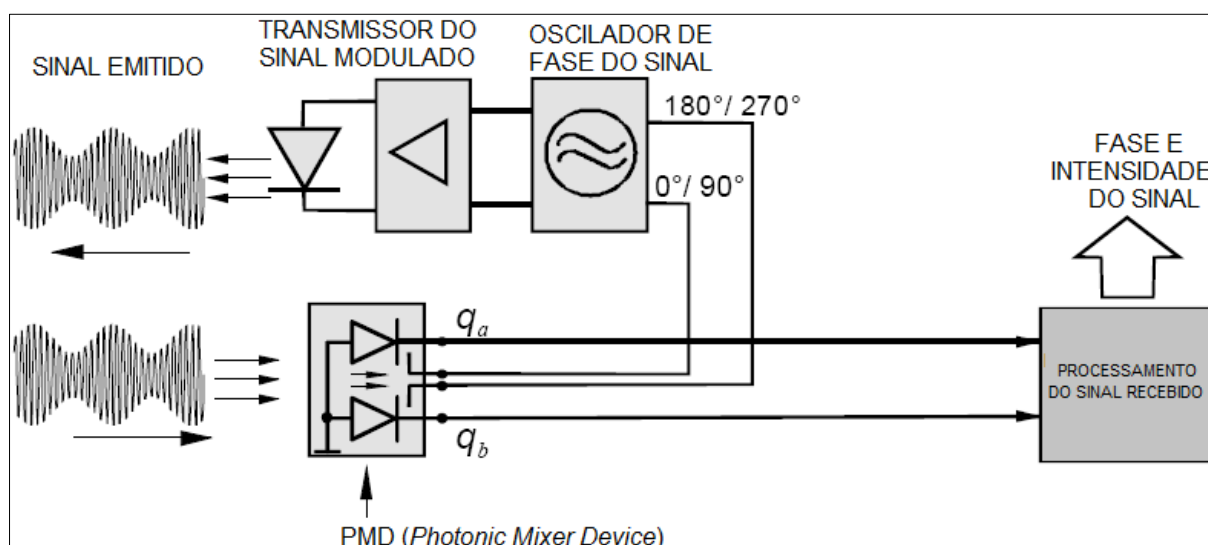


FIGURA 2.7 – Princípio de funcionamento do sistema PMD
 FONTE: LUAN (2001)

O sinal modulado é emitido com uma fase determinada pelo oscilador do sistema. Para que se possa realizar a medida da distância o sinal recebido deve ter fase diferente da que foi emitido. No dispositivo PMD as cargas elétricas do sinal recebido são separadas de acordo com a voltagem do diodo de leitura, também chamado de fotodiodo. O arquivo de saída deste dispositivo contém informação de fase e intensidade do sinal recebido, o que possibilita obter informação de distância e intensidade para cada pixel da imagem (LUAN, 2001).

O sensor utilizado no imageamento é um CMOS (*Complementary Metal-Oxide-Semiconductor*) que tem tecnologia similar a dos sensores CCD (*Charged-Coupled Device*). O CMOS apresenta a vantagem de ser um circuito integrado com baixo consumo de energia. No CMOS, a conversão de voltagem e a amplificação do sinal ocorrem em cada fotodiodo e os valores podem ser lidos independentemente.

A desvantagem é que a amplificação no fotodiodo gera imagens com maior presença de ruído (PECHT e FOSSUM, 1997).

Quando os fótons sensibilizam o sensor CCD a carga elétrica é transferida sequencialmente, linha por linha, coluna por coluna. A conversão de voltagem e amplificação do sinal é realizada fora da área do sensor. Uma vantagem do sensor CCD é a geração de imagens mais nítidas devido à menor complexidade no seu sistema. Por processar as cargas elétricas de forma unificada menores interferências são causadas, diminuindo a presença de ruído (KEMENY *et al.*, 1991).

A diferença no princípio de funcionamento dos sensores CCD e CMOS é ilustrada com a Figura 2.8.

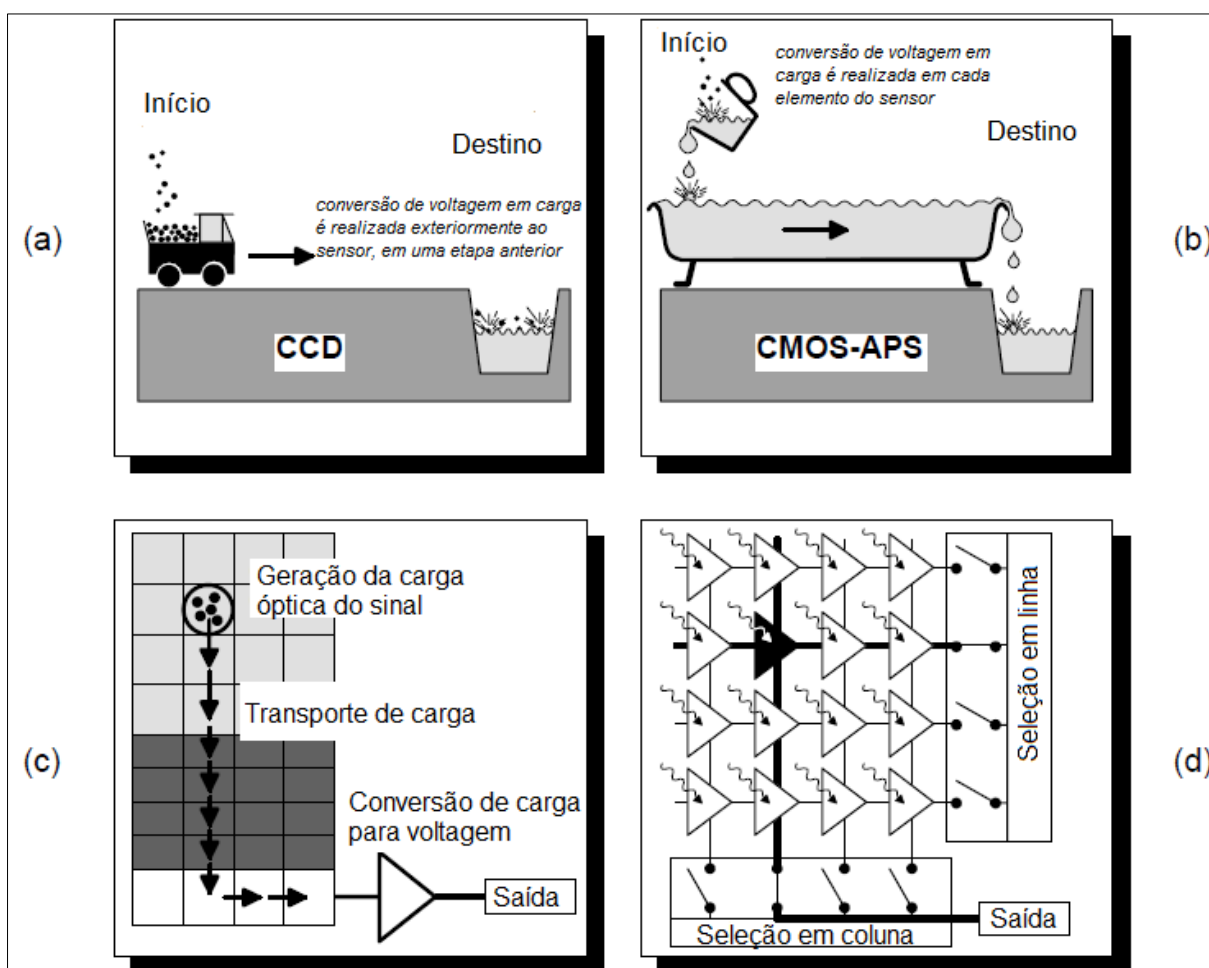


FIGURA 2.8 – Captação da carga do sinal em sensores CCD e CMOS
FONTE: LANGE (2000)

O princípio de funcionamento do sensor CCD é ilustrado com as Figuras 2.8a e 2.8c onde a leitura da informação é feita de forma sequencial pelos elementos do sensor. Esta varredura realizada no sensor CCD faz com que a geração da

imagem final seja mais lenta que no sensor CMOS, que realiza a conversão fóton-elétron e elétron-voltagem diretamente em cada elemento sensor, conforme é ilustrado com as Figuras 2.8b e 2.8d. Com isto o sensor CMOS tem maior velocidade de transferência de cargas acumuladas para o conversor analógico-digital.

Fotodiodos são os elementos fotossensíveis utilizados como portas de entrada para o sinal luminoso em sensores CMOS ou CCD. Estes captam cargas elétricas presentes no sinal e estão inseridos sobre uma placa de Silício. O transporte das cargas para o interior da placa é explicado fisicamente através dos campos de franjas, ilustrado com a Figura 2.9. Os campos de franja estão representados para diferentes voltagens, os elementos do sensor apresentado tem entradas para três voltagens 10V, 5V e 0V.

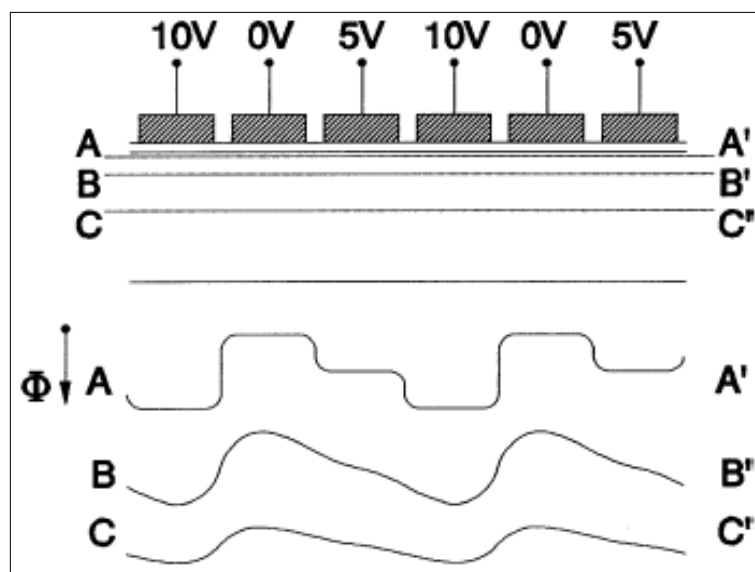


FIGURA 2.9 – Representação de campos de franja
 FONTE: THEUWISSEN (1995)

A seção A-A' na Figura 2.9 ilustra os campos de franja gerados mais próximos à superfície da placa. A forma do sinal pode ser modelada de forma aproximada por segmentos de linhas retas. Na seção B-B', com profundidade média na placa de Silício, a influência do campo elétrico das entradas vizinhas a porta central de 5V está em seu nível máximo. Quanto mais fundo encontra-se a entrada de cargas na placa de Silício, menor será a interferência dos campos elétricos gerados pelas portas de entrada das cargas vizinhas, conforme pode ser visualizado na seção C-C'. Nesta profundidade, diferentes portas de entrada estão praticamente

à mesma distância da superfície e o valor de dispersão do campo de franja diminui. O campo de franja mínimo de uma entrada que têm profundidade máxima proporciona ao sensor o maior aproveitamento, aumentando assim a velocidade no transporte de cargas (THEUWISSEN, 1995).

Quanto maior a modulação na voltagem da entrada das cargas, maior o potencial de armazenamento, conforme ilustrado com a Figura 2.10.

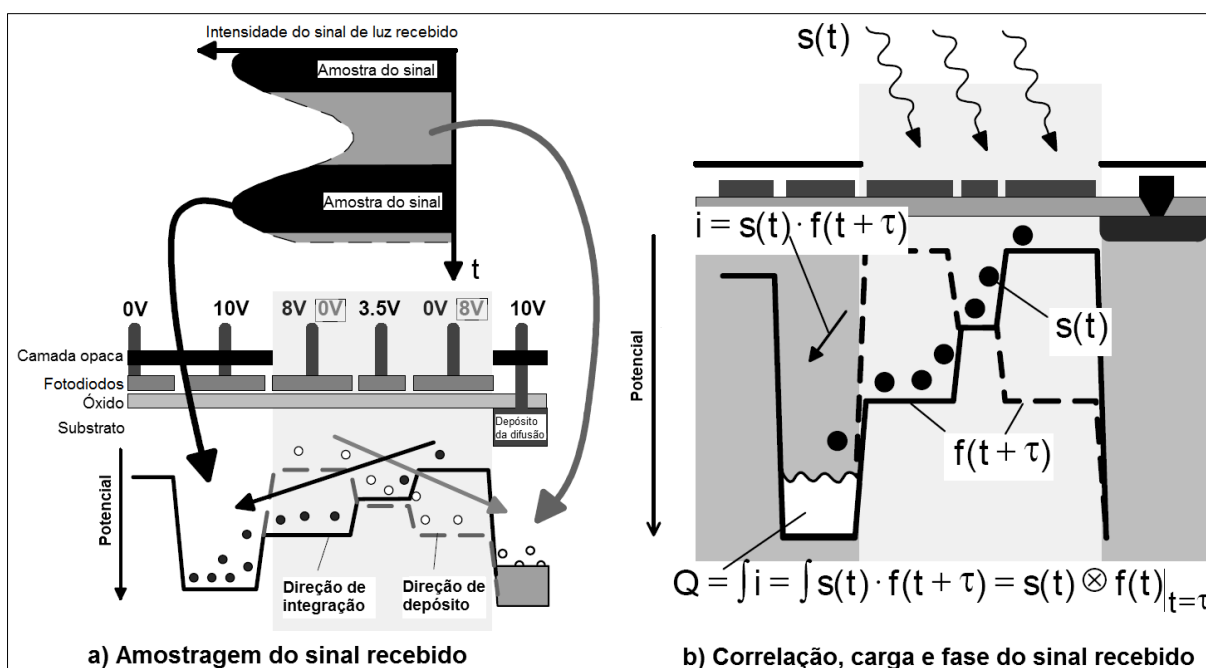


FIGURA 2.10 – Princípio de armazenamento de cargas em sensores TOF
 FONTE: LANGE (2000)

O sinal modulado recebido $s(t)$ e a Função de Correlação $f(t + \tau)$ do sinal modulado emitido são ilustrados com a Figura 2.10b. A Figura 2.10a ilustra a luz incidente no sensor com as cargas captadas e armazenadas de acordo com a modulação do fotodiodo.

O dispositivo PMD utiliza a tecnologia CMOS para o imageamento, com dois elementos fotossensíveis e dois diodos que captam as cargas elétricas do sinal modulado recebido. As informações ópticas e elétricas misturadas geram os píxeis da imagem com informação de distância dos pontos imageados. A Figura 2.11 ilustra este elemento sensor.

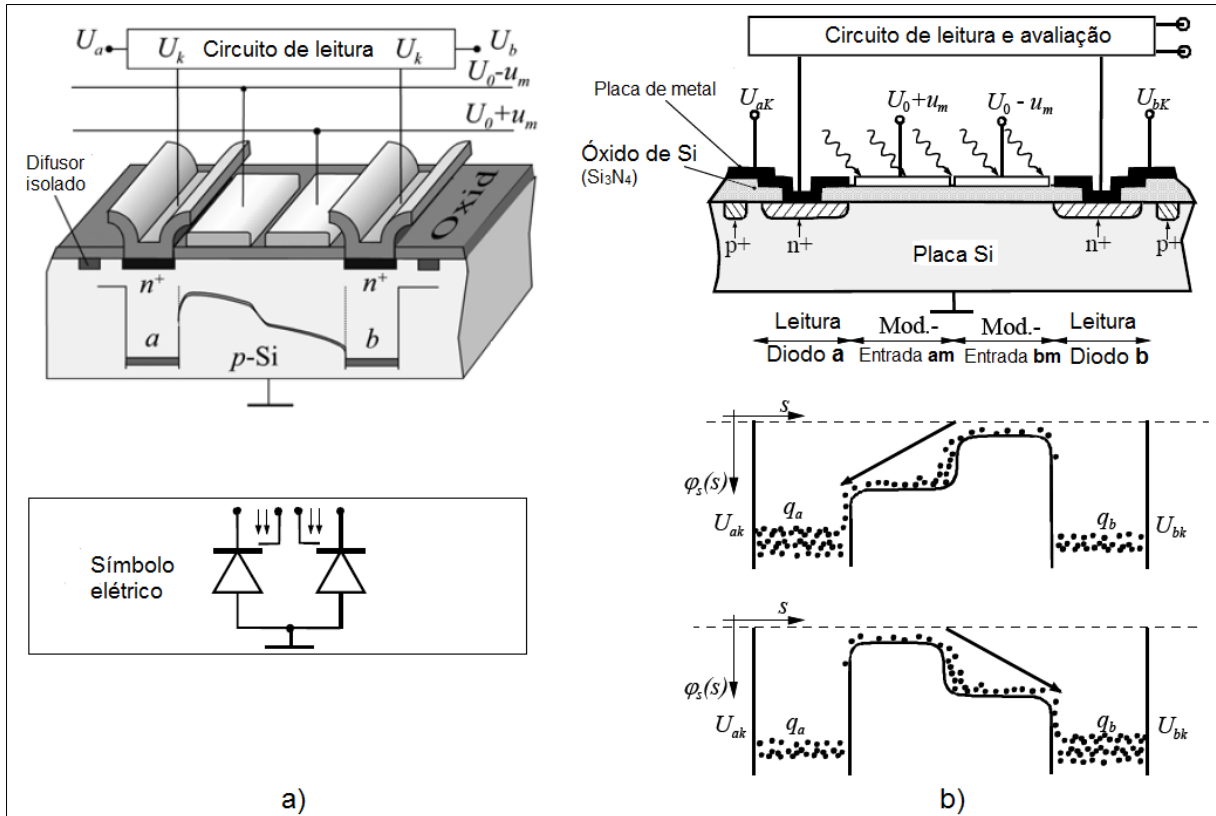


FIGURA 2.11 – Princípio de captação de cargas pelo sensor PMD
 FONTE: LUAN (2001)

As placas claras e centrais na Figura 2.11a correspondem ao circuito de leitura do sinal óptico, estas placas são condutoras e transparentes para possibilitar a entrada de luz. Os diodos são os componentes do circuito de leitura que captam e direcionam as cargas elétricas recebidas em um determinado sentido, são ilustrados com as placas mais afastadas na Figura 2.11a. As cargas que chegam são distribuídas de acordo com a voltagem do diodo. Uma fina camada de óxido isola os circuitos de leitura do dispositivo.

A voltagem da carga que entra no sistema é controlada de acordo com a modulação do sinal aplicada pelo dispositivo emissor. Sendo assim, pode ser captada pelo diodo da direita ou esquerda, que registrará a quantidade de carga recebida de acordo com sua voltagem. A distribuição de potencial na região superficial do dispositivo é influenciada pela seleção de cargas que faz este sistema dinâmico e equilibrado. Para valores não nulos, a luz modulada recebida e a diferença de fase podem ser comparadas através das cargas elétricas recebidas. A quantidade de carga captada pelos diodos depende diretamente da diferença de fase entre o sinal modulado emitido e o recebido pelo sensor. Esta informação pode ser utilizada para calcular a diferença de fase entre o sinal emitido e o recebido, pois

é diretamente proporcional a carga que cada diodo captou. Com isto, a distância entre o sensor e o objeto pode ser calculada utilizando o princípio da diferença de fase. No entanto, se a luz incidente é modulada como um sinal retangular, mas sua fase entre a emissão e a recepção é igual a zero, a carga será captada por apenas um dos diodos e a distância resultante será igual a zero (MÖLLER *et al.*, 2005).

A Figura 2.12 ilustra o comportamento dos diodos de leitura ao receber o sinal com distância diferente de zero entre o alvo e o sensor. Na Figura 2.12a é ilustrado o sinal luminoso recebido por um elemento fotossensível. Este sinal é captado pela porta de entrada P_A do fotodiodo, que registra parte desta carga de acordo com sua modulação.

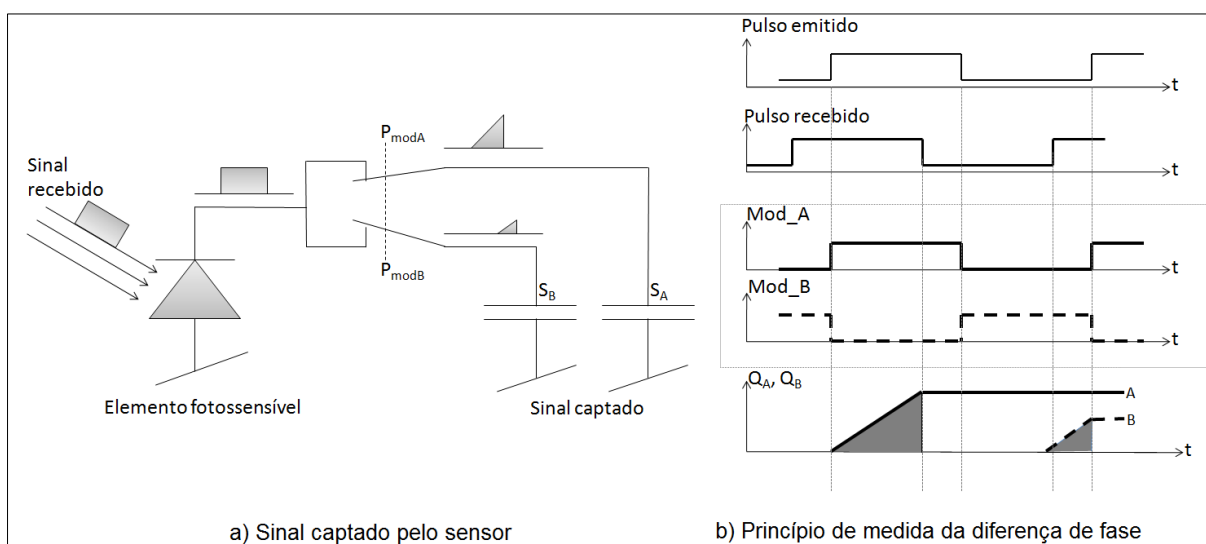


FIGURA 2.12 – Medida da diferença de fase do sinal recebido
 FONTE: Adaptado de MÖLLER *et al.* (2005)

Na Figura 2.12a o sinal recebido pelo elemento fotossensível do sensor é ilustrado no momento em que é captado pela porta com modulação A (P_{modA}). A carga é captada pelos dois fotodiodos com defasagem de meio ciclo, com isto cada um capta parte da carga recebida. A Figura 2.12b ilustra a medida da diferença de fase do sinal recebido através da quantidade de carga que foi captada pelos fotodiodos com modulação Mod_A e Mod_B. A voltagem do diodo é estabelecida de acordo com a modulação do sinal luminoso que será emitida pelo dispositivo.

2.5 CÂMARAS PMD

As câmaras TOF com tecnologia PMD consistem de um *chip* sensor, fonte de iluminação, transmissor e receptor ópticos, além de periféricos eletrônicos e interface digital de controle realizada através de *software*. Dependendo das exigências de aplicação os componentes da câmara podem ser adaptados. Cada um deles pode afetar os parâmetros internos da câmara, tais como o campo de visão (FOV), taxa de captação e tempo de integração para a aquisição das imagens. A distância da superfície a ser medida é o fator preponderante para a escolha destes parâmetros. O fato destas câmaras serem modulares amplia sua gama de aplicações. Isto é possível levando-se em conta as condições adicionais que cada aplicação pode exigir, tais como a luz exterior ao sistema e a necessidade de mudança na fonte de iluminação utilizada (PMD Technologies, 2009).

O sensor PMD proporciona o imageamento instantâneo dos objetos utilizando um sensor com tecnologia CMOS adaptado. Este sensor é um arranjo de elementos fotossensíveis que permitem a rápida detecção e modulação do sinal luminoso com suas variações. Isto é feito de acordo com a distância da superfície que atinge do objeto imageado. Pode adquirir dados de distância e intensidade simultaneamente, sem precisar de um sistema de digitalização mais complexo como um *laser scanner*. Apresenta a desvantagem de ser muito sensível à luz exterior ao sistema que interfere causando a presença de ruído na imagem TOF e consequente erro na medida de distância (KHONGSAB, 2009).

O desempenho do sistema PMD depende da fonte de iluminação utilizada, capacidade de fornecimento de energia e eficiência óptica na criação da imagem. Normalmente é utilizada fonte de iluminação LED nas câmaras PMD. No entanto, outros fabricantes utilizam diodos LASER para a iluminação, isto porque possibilita realizar medidas de distâncias maiores. O desenvolvimento dos sistemas LED fez com que sua eficiência de transformação de energia elétrica em energia óptica seja de 30%. Com a iluminação LED tem-se um sinal luminoso já modulado, devido a suas características eletro-ópticas. Como uma parte considerável da luz fica na borda do feixe, isto se torna uma desvantagem, pois esta área normalmente fica fora do campo de visão do sensor PMD. Outra desvantagem diz respeito ao limite de modulação dos LED's comerciais, que trabalham na faixa de 20 MHz à 30 MHz. Os diodos LASER têm eficiência óptica de até 50%, dependendo da potência de saída

utilizada, sendo de aproximadamente 100 MHz a modulação máxima da frequência que pode ser atingida. O perfil do feixe LASER pode ser adaptado ao campo de visão do sensor PMD. A desvantagem é que este seria um circuito modular mais complexo e que teria necessidade de um maior número de etapas para conseguir estabilizar a fase da onda portadora do sinal. Outra desvantagem é que a implantação de um sistema LASER necessita de maior atenção à segurança dos olhos do que o sistema LED (RINGBECK, 2007).

Com a Figura 2.13 ilustra-se a medida de distância com a câmara TOF modelo 19k da PMD. A fonte de iluminação LED emite o sinal luminoso em direção dos objetos que estão no campo visual da câmara. O retorno deste sinal é captado pelo sensor e possibilita o cálculo da diferença de fase entre o sinal emitido e o recebido.

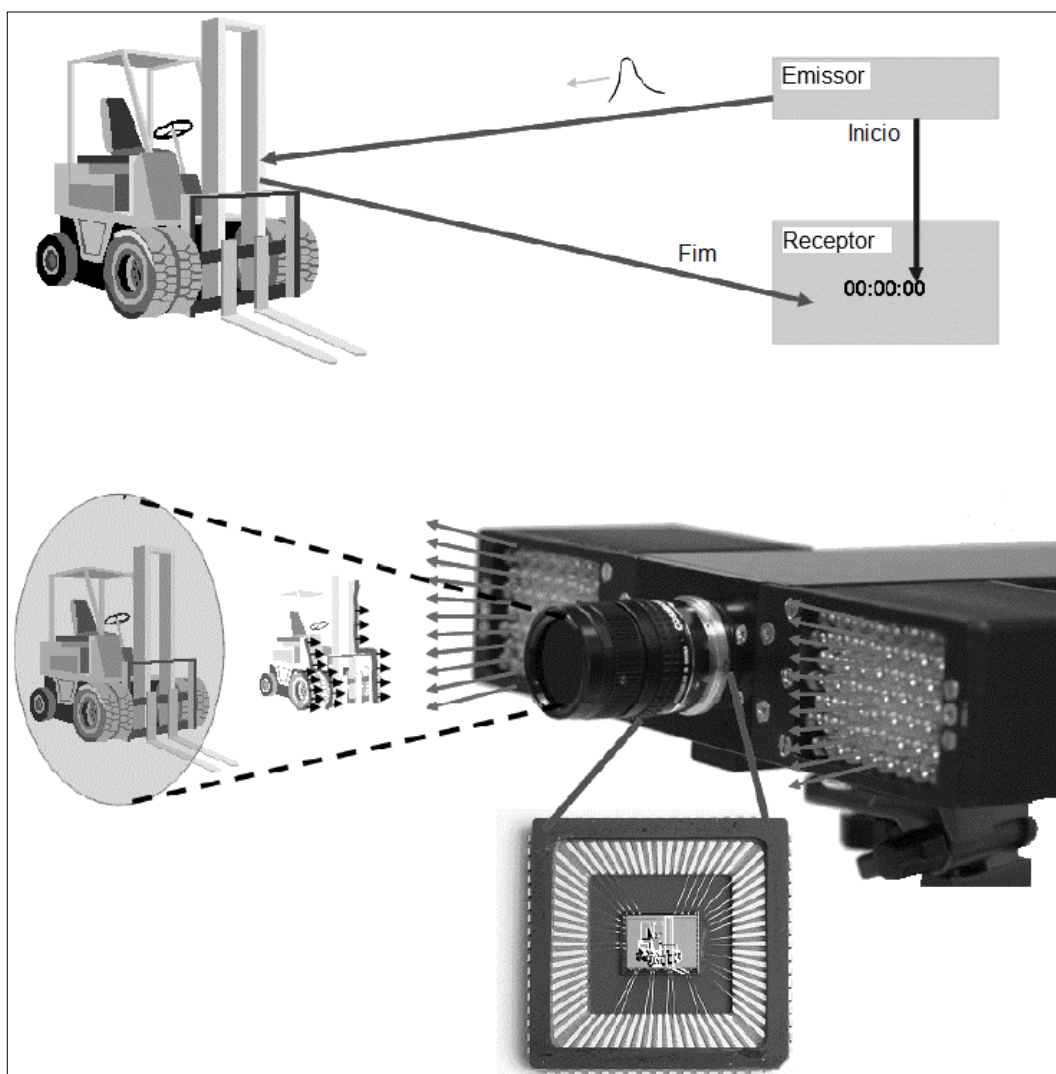


FIGURA 2.13 – Medida de distância com a câmara PMD
FONTE: MOLLER *et al.* (2005)

2.5.1 Câmara PMD CamCube 2.0

A câmara TOF modelo PMD[VISION][®]CamCube 2.0 funciona em ambientes internos e externos, com sensor de 204x204 píxeis que captam os níveis de cinza da imagem de intensidade. Simultaneamente, realiza a medida da quantidade de carga recebida utilizada para determinar a diferença de fase entre o sinal emitido e o recebido. Isto possibilita o cálculo da distância entre o sensor e os objetos presentes na cena. A Figura 2.14 ilustra a câmara PMD CamCube 2.0 com as fontes de iluminação LED acopladas em suas laterais.



FIGURA 2.14 – Câmara PMD CamCube 2.0
FONTE: PMD Technologies (2009)

Este equipamento pode ter seu campo de visão variável, possibilitando a diminuição de distorções, manchas ou outras imperfeições da imagem. O *software* de interface da câmara com o computador apresenta a possibilidade de trabalhar com dados brutos para o processamento das imagens, além de funcionar em diferentes canais de frequência. Também disponibiliza compatibilidade com o *software* Matlab para realizar esta interface.

A imagem de intensidade captada de uma parede utilizando a câmara PMD CamCube 2.0 é ilustrada com a Figura 2.15.

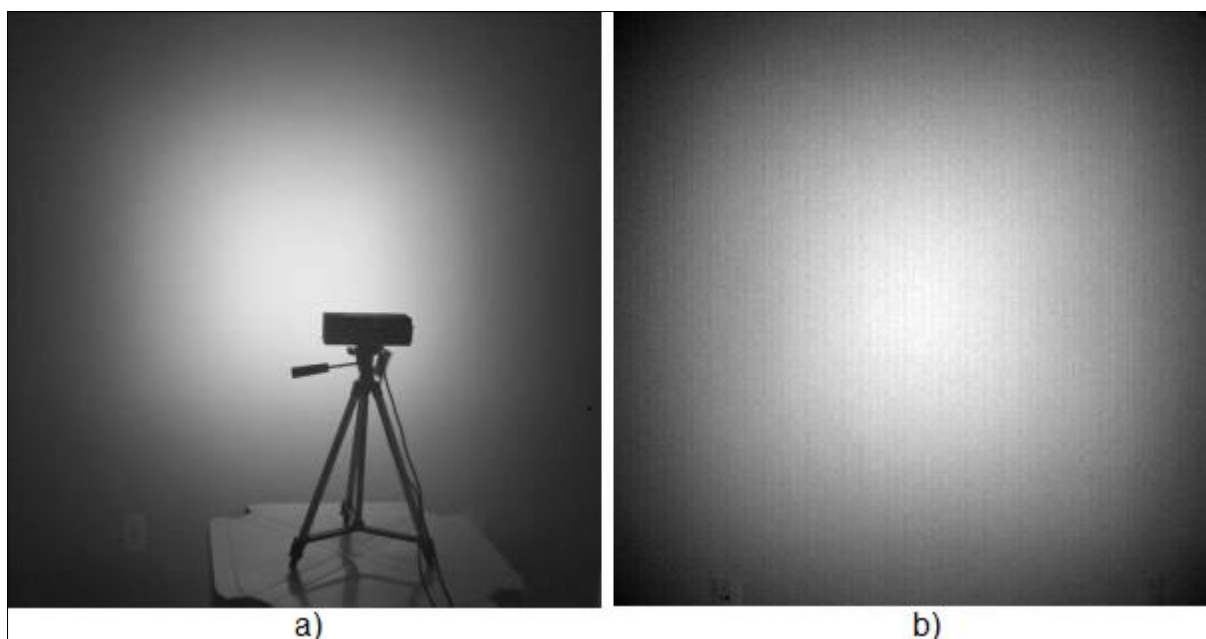


FIGURA 2.15 – Imagem captada com a câmara PMD CamCube 2.0
 FONTE: CENTENO e JUTZI (2010)

Com a Figura 2.15a é ilustrada a câmara PMD CamCube 2.0 instalada em um tripé sobre uma mesa. Na Figura 2.15b tem-se a imagem infravermelha da superfície plana de uma parede obtida com esta câmara. O Quadro 2.1 ilustra as especificações técnicas da câmara PMD CamCube 2.0.

PARÂMETROS	VALOR PADRÃO	OBSERVAÇÕES
Tipo do sensor:	PhotonICs PMD41k-S (204x204 píxeis)	Tamanho efetivo do pixel no sensor igual a 45µm.
Distância de medição:	0,3 – 7metros	
Precisão na medida de distância (1σ):	< 3mm	Para área central da imagem obtida à 2m do sensor, em superfície com refletividade de 90%.
Frequência de aquisição de imagens:	25 fps	Configuração padrão.
Campo de visão (FOV):	40°x40°	f = 12,8mm.
Comprimento de onda da fonte de iluminação:	870nm	Infravermelho próximo.
Fonte de iluminação [V]:	12 V ± 10%	
Interface	USB 2.0	
Temperatura de operação:	0°C à 50°C	
Temperatura de armazenamento:	-20°C à 85°C	

QUADRO 2.1 - Especificações técnicas da câmara PMD CamCube 2.0
 FONTE: Adaptado de PMD Technologies (2009)

O sensor PhotonICs PMD41k-S utilizado na câmara PMD CamCube 2.0 vem com um dispositivo SBI para a supressão de cargas provenientes da iluminação exterior ao sistema. Estas cargas causam a saturação dos píxeis da imagem TOF.

2.5.2 Dispositivo SBI

O dispositivo SBI (*Supression of Background Illumination*) é uma solução técnica encontrada para melhorar o contraste das imagens geradas com o sensor PMD em ambientes com iluminação exterior. A presença desta iluminação na cena do objeto imageado causa maior presença de ruído no sinal captado pelo sensor.

Esta iluminação pode saturar os elementos do sensor fazendo com que ocorram falhas na medida de distância. Este efeito pode ser minimizado utilizando o tempo de integração adequado para a tomada das imagens. Outros distúrbios que podem ocorrer são devidos à corrente negra (DC - *Dark Current*). Este efeito é causado porque o sensor não capta o valor zero na imagem que seria a falta completa de iluminação nas superfícies da cena. A corrente negra não pode ser evitada em dispositivos semicondutores especialmente quando há altas temperaturas. Com uma temperatura de 80°C a corrente negra pode ser 1000 vezes maior do que o normal, o que afeta significativamente a qualidade das medidas realizadas. Para tornar o dispositivo PMD mais confiável na medida de distâncias, foi criado o circuito SBI que suprime instantaneamente a iluminação de fundo. Neste circuito é utilizada uma técnica para a captação do sinal luminoso minimizando a interferência de fatores externos. Isto possibilita realizar medidas de distância confiáveis, mesmo em ambientes onde o sinal é modificado por interferência de iluminação externa ou por altas temperaturas. O sistema SBI pode ser desativado ou até mesmo ajustado para que seja possível realizar medidas de distância com qualidade em cenas tomadas em diferentes ambientes, independente da presença de iluminação exterior (MÖLLER, 2005).

O circuito SBI adiciona cargas elétricas de compensação instantânea nos diodos de leitura minimizando os efeitos de saturação causados por fatores externos ao sistema. Com o SBI espera-se que o sensor capte apenas o sinal correlacionado com a medida de distância, sem interferência de iluminação exterior, reduzindo assim a interferência da iluminação de fundo no sinal recebido.

A Figura 2.16a ilustra um sensor sem o dispositivo SBI, a carga captada com influências externas de iluminação e calor é maior do que a enviada pela fonte de iluminação, refletida pela superfície do objeto e recebida pelo sensor. Neste caso a medida de distância está influenciada por fatores externos ao sistema e conterà erros. Na Figura 2.16b as cargas geradas por fatores externos ao sistema são

minimizadas pelo dispositivo SBI. Com isto, tem-se maior quantidade de carga captada com o sinal recebido eliminando a carga gerada por fatores externos.

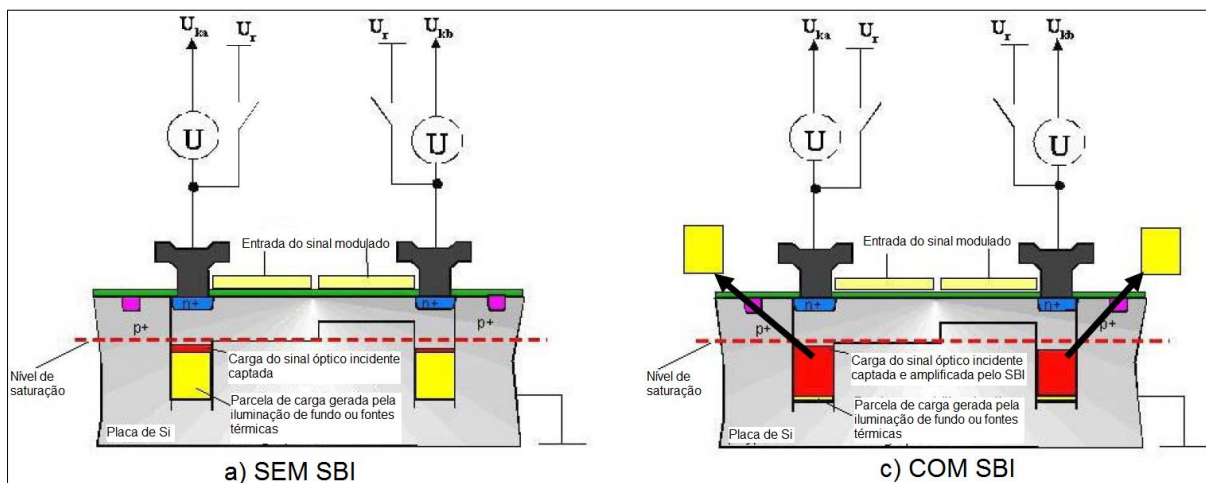


FIGURA 2.16 – Princípio de funcionamento do SBI
FONTE: MÖLLER *et al.* (2005)

Câmaras TOF com iluminação LED infravermelha utilizam o dispositivo SBI para a supressão da iluminação de fundo. Outros modelos de câmaras TOF utilizam iluminação LASER para evitar o problema com a iluminação exterior.

2.5.3 Modelos de câmaras TOF

Diferentes câmaras TOF foram desenvolvidas nos últimos anos, a Figura 2.17 ilustra alguns modelos destas câmaras.

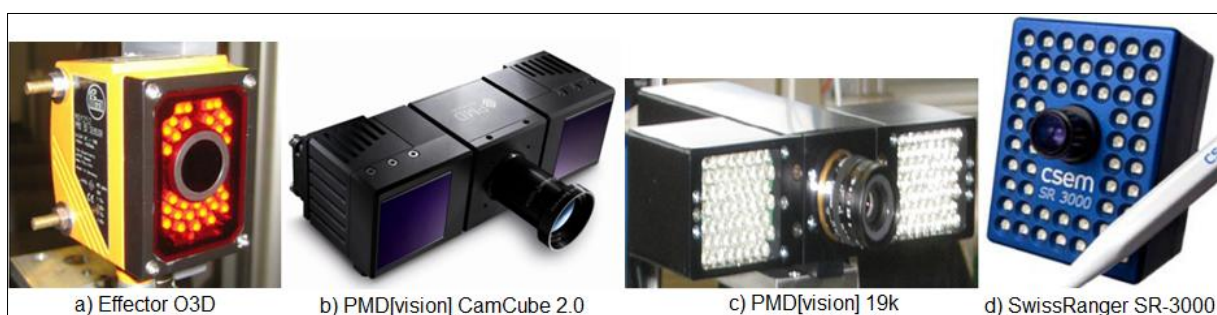


FIGURA 2.17 – Modelos de câmaras TOF

a) Effector O3D. FONTE: <http://www.ifm-electronic.com>

b) PMD[vision] CamCube 2.0. FONTE: <http://www.pmdtec.com>

c) PMD[vision] 19k. FONTE: <http://www.pmdtec.com>

d) SwissRanger SR-3000. FONTE: <http://www.mesa-imaging.ch>

O Quadro 2.2 descreve as especificações técnicas destas câmaras TOF.

	a)Effector O3D	b)PMD[vision] CamCube 2.0	c)PMD[vision] 19k	d)SwissRanger SR-3000
Resolução (píxeis)	64 x 50	204 x 204	160 x 120	176 x 144
Dimensões dos píxeis (μm)	100 x 100	45 x 45	40 x 40	40 x 40
Distância focal (mm)	8,6	12,8	12,0	8,0
Fonte de iluminação	1 matriz LED	2 matrizes LED	2 matrizes LED	1 matriz LED
Modulação da fonte de iluminação (nm)	850	870	870	850
Frequência de modulação	20 MHz	20 MHz	20 MHz	20 MHz
Frequência na aquisição de imagens	Máximo 100 fps	Máximo 25 fps	Máximo 15 fps	Máximo 40 fps
Conexão	Ethernet	USB 2	Ethernet	USB 2
Dimensões (mm)	55 x 45 x 85	194 x 60 x 60	220 x 210 x 55	60 x 50 x 65

QUADRO 2.2 – Especificações técnicas de câmaras TOF
FONTE: Adaptado de RAPP (2007)

A partir do Quadro 2.2 verifica-se que estes modelos de câmaras TOF em sua configuração padrão possuem fonte de iluminação LED, distância focais variando de 8mm à 12,8mm e apresentam pequenas dimensões.

2.6 ERROS DE MEDIDA

Observações realizadas com instrumentos de medida estão acompanhadas de erros provenientes da falibilidade humana, imperfeição na fabricação do equipamento e de interferências causadas pelo ambiente em que o instrumento utilizado e o objeto estavam no momento em que se realizou a medida. Erros de observação são tradicionalmente classificados como erros grosseiros, sistemáticos e acidentais. Erros grosseiros devem ser detectados e evitados pelo observador com os devidos cuidados na obtenção da informação, também ocorrem devido à presença de ruído nas observações. Erros sistemáticos se repetem seguindo um determinado padrão e podem ser preditos e corrigidos. Existem opções para evitá-los através de técnicas de observação, ou então, eliminá-los *a posteriori* através de fórmulas específicas. Os erros acidentais ou aleatórios são randômicos, não previsíveis e podem ser distribuídos entre o conjunto de observações por técnicas

estatísticas. É comum o uso da expressão “propriedades estatísticas das observações” devido a este erro (GEMAEL, 1994).

Erros na medida de distância utilizando câmaras TOF também podem ser divididos em não-sistemáticos e sistemáticos, conforme descrito nas seções 2.6.1 e 2.6.2, onde serão apresentados 3 erros não-sistemáticos e 7 erros sistemáticos.

2.6.1 Erros não-sistemáticos em câmaras TOF

De acordo com MAY *et al.* (2008) a classificação de erros não-sistemáticos na medida de distância utilizando câmaras TOF pode ser feita da seguinte maneira:

1) Erro devido à relação sinal-ruído (*Signal-to-noise*): quando a relação da carga recebida com o sinal é baixa e o ruído presente é alto, haverá distorção na medida de distância que não poderá ser corrigida posteriormente. Para diminuir este erro pode-se tomar cuidado com o tempo de exposição do sensor na aquisição da imagem e também amplificar a iluminação do sistema. Outra solução é filtrar os valores medidos com baixas amplitudes no sinal recebido.

2) Reflexão do sinal por múltiplos caminhos (*Multiple ways reflection*): em objetos com descontinuidade em suas superfícies o sinal emitido pode percorrer diferentes caminhos antes de retornar ao sensor. Exemplos são objetos com superfícies côncavas que podem refletir várias vezes o sinal e gerar erro na medida de distância. Neste caso o sinal é refletido com sobreposição, ou seja, pode ser captado o sinal da última superfície que o refletiu, gerando uma distância diferente do valor esperado.

3) Espalhamento da luz (*Light scattering*): ocorre na lente da câmara causado pela presença de objetos próximos. Este efeito e o causado pela reflexão por múltiplos caminhos são imprevisíveis, pois a topologia da cena observada é desconhecida *a priori*.

2.6.2 Erros sistemáticos em câmaras TOF

Segundo RAPP (2007) nas câmaras TOF, erros também indicam a relação entre a variância da distância e a amplitude do sinal captado pelo sensor. A relação

estabelecida é que a variância dos dados de distância é inversamente proporcional à raiz quadrada da amplitude do sinal recebido para realizar a medida. Alguns erros sistemáticos das câmaras TOF estudados por RAPP foram:

- 1) Erro devido a uma função não harmônica utilizada para correlacionar o sinal emitido ao recebido;
- 2) Ruídos relacionados com o tempo de integração. Este tempo pode causar exposição insuficiente ou saturação dos elementos do sensor;
- 3) Erros geométricos no posicionamento dos píxeis devido ao sistema óptico da câmara.

O erro devido à falta de harmonia na função de correlação entre o sinal emitido e o recebido pode ser causado quando o sistema óptico utilizado emite o sinal de referência com sua forma inicial e recebe o sinal refletido com forma diferente. Com isto, a função que representa o sinal recebido não terá a forma senoidal teórica do sinal emitido. Isto ocorre por conter harmônicos de Fourier ímpares, quando é necessária uma amostra com pelo menos quatro pontos para definir a FC entre os sinais. Este erro tem grande influência no cálculo da distância do objeto, pois é a FC que possibilita a medida da diferença de fase entre o sinal emitido e o recebido.

A presença de ruído pode ser notada variando o TI na aquisição da imagem. O conjunto de dados apresenta maiores distorções radiométricas e geométricas quando a presença de ruído é forte. Quando o TI é aumentado o ruído observado no conjunto de dados pode diminuir. Porém, valores extremamente altos introduzem erros na medição por causar saturação do sensor. Com esta informação procura-se definir uma função para a modelagem do ruído de acordo com o tempo de integração. Analisando dados obtidos com diferentes TI pode-se especificar qual o melhor para cada situação.

Erros causados por exposição insuficiente do sensor não são considerados sistemáticos, porém podem ser preditos. Se o valor da amplitude do sinal é reduzido, o erro na medida da distância aumenta. Para reduzir os píxeis obtidos com exposição insuficiente, pode-se definir um limite no valor da amplitude do sinal. Outra forma de controlar a exposição é com o TI na obtenção da imagem. Píxeis que tem amplitude menor que 1% do valor máximo das amplitudes na imagem TOF são considerados píxeis com exposição insuficiente.

Erros de posicionamento dos píxeis devido ao sistema óptico da câmara podem ser notados quando capta-se a imagem de uma fachada com portas e janelas. As linhas horizontais e verticais que representam estes elementos na imagem aparecem com curvaturas de acordo com o sistema de lentes utilizado na câmara. A distorção de lentes tem um padrão fixo em câmaras com sensor CMOS ou CCD e pode ser corrigida geometricamente através dos POI da câmara que captou a imagem.

Erros sistemáticos em câmaras TOF também foram estudados por FUCHS e HIRZINGER (2008) e MAY *et al.* (2008) e foram classificados da seguinte maneira:

4) Erro na medida de distância (*Distance-related error*): este erro é causado devido à assimetria da forma do sinal infravermelho recebido pelo sensor. Teoricamente assume-se que este sinal possui forma senoidal e harmônica com a forma do sinal emitido, o que na prática pode não acontecer. Sendo assim, o pressuposto básico para que se possa calcular o atraso de fase é que o sinal luminoso emitido e o recebido são harmônicos e com forma senoidal. Consequentemente, se o cálculo do atraso de fase do sinal é impreciso, a distância entre o objeto e o sensor também será calculada de forma imprecisa.

5) Erro na amplitude do sinal captado (*Amplitude-related error*): o sensor não capta a energia eletromagnética recebida com o sinal perfeitamente. Deixando-se a câmara e o objeto na mesma posição podem-se obter diferentes medidas de distância devido a esta imperfeição na fabricação dos elementos do sensor. Este erro é relacionado com a amplitude de valores na captação da imagem, depende da distância e de características como a refletividade das superfícies dos objetos.

6) Erro devido à latência dos elementos do sensor (*Latency-related error*): o atraso de fase do sinal recebido é calculado através das latências com que o sensor captou o sinal. Está relacionado com propriedades semicondutoras dos materiais utilizados nos elementos sensores que são responsáveis pela medida da quantidade de carga recebida. É causado quando o sinal emitido e o recebido são correlacionados diretamente na matriz do sensor. Diferentes latências do sinal devem ser captadas por cada elemento do sensor para possibilitar o cálculo da distância de cada pixel de forma confiável.

7) Ruído com padrão fixo (*FPN - Fixed pattern noise*): é relacionado com o erro devido à latência e ocorre devido às propriedades dos materiais utilizados na fabricação de cada elemento do sensor CMOS. Este é um ruído com padrão fixo,

pode ser corrigido a partir de uma imagem que tenha um pixel com valor constante que servirá como referência para a calibração dos valores dos pixels vizinhos. Tendo-se como referência um pixel obtido em uma superfície uniforme de um objeto, pode-se utilizar um padrão de similaridade como referência para os outros pixels. Sendo assim, a qualidade dos dados depende da posição do pixel na imagem.

Os últimos quatro erros sistemáticos podem ser corrigidos utilizando o método de calibração descrito em Fuchs *et al.* (2007). Conforme realizado em experimento por May *et al.* (2008) os resultados alcançados no mapeamento de uma sala obtiveram a precisão centimétrica. Este experimento foi realizado com o objetivo de medir paredes opostas de uma sala com o sensor TOF em movimento, instalado em uma plataforma móvel. O erro encontrado na medida das distâncias também foi influenciado por erros na estimação do posicionamento do sensor que é obtido com a Orientação Exterior da câmara no momento de aquisição das imagens. Durante o registro dos quadros fotográficos, o erro em rotação foi determinado como sendo igual a $2,2^\circ$ e o erro de translação foi de 0,71m no eixo X , 0,04m no eixo Y e de -0,21m no eixo Z . A distância calculada entre paredes opostas foi igual a 10,5m para a distância de referência de 10,8m. A diferença entre as duas medidas resultou em 0,3m, o que representa aproximadamente 2,8% da distância de referência. A nuvem de pontos 3D gerada por MAY *et al.* (2008) é ilustrada com a Figura 2.18.

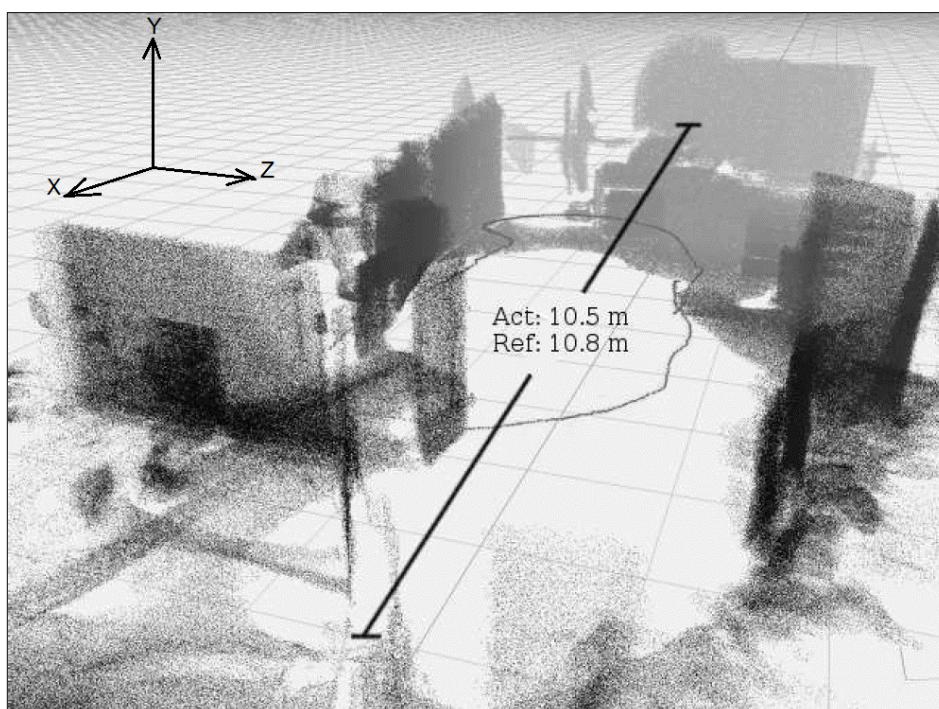


FIGURA 2.18 – Nuvem de pontos 3D gerada a partir de imagem TOF
FONTE: MAY *et al.* (2008)

sistema referencial de imagem levógiro (C, L) tem sua origem no canto superior esquerdo. Através das Equações (2.23) e (2.24) esta origem pode ser transladada para o centro da imagem (MACHADO, 2006).

$$C' = C - \frac{n_C - 1}{2} \quad (2.23)$$

$$L' = L - \frac{n_L - 1}{2} \quad (2.24)$$

onde:

C, L – Sistema referencial de coordenadas da imagem (píxeis);

n_C, n_L – Número total de colunas e linhas da imagem (píxeis);

C', L' – Sistema referencial auxiliar no centro da imagem (píxeis).

Para tornar o sistema referencial auxiliar (C', L') de imagem levógiro em um sistema dextrógiro (x_{im}, y_{im}) pode-se realizar uma reflexão do eixo L' através da Equação (2.26).

$$x_{im} = C' \quad (2.25)$$

$$y_{im} = -L' \quad (2.26)$$

onde:

x_{im}, y_{im} – Coordenadas de um ponto no sistema referencial dextrógiro da imagem (píxeis).

Com isto tem-se um sistema referencial dextrógiro centralizado na imagem e que se relaciona com o sistema referencial fotogramétrico projetado através da translação de eixos determinada pelas coordenadas (x_o, y_o) do PP, conforme ilustrado com a Figura 2.20.

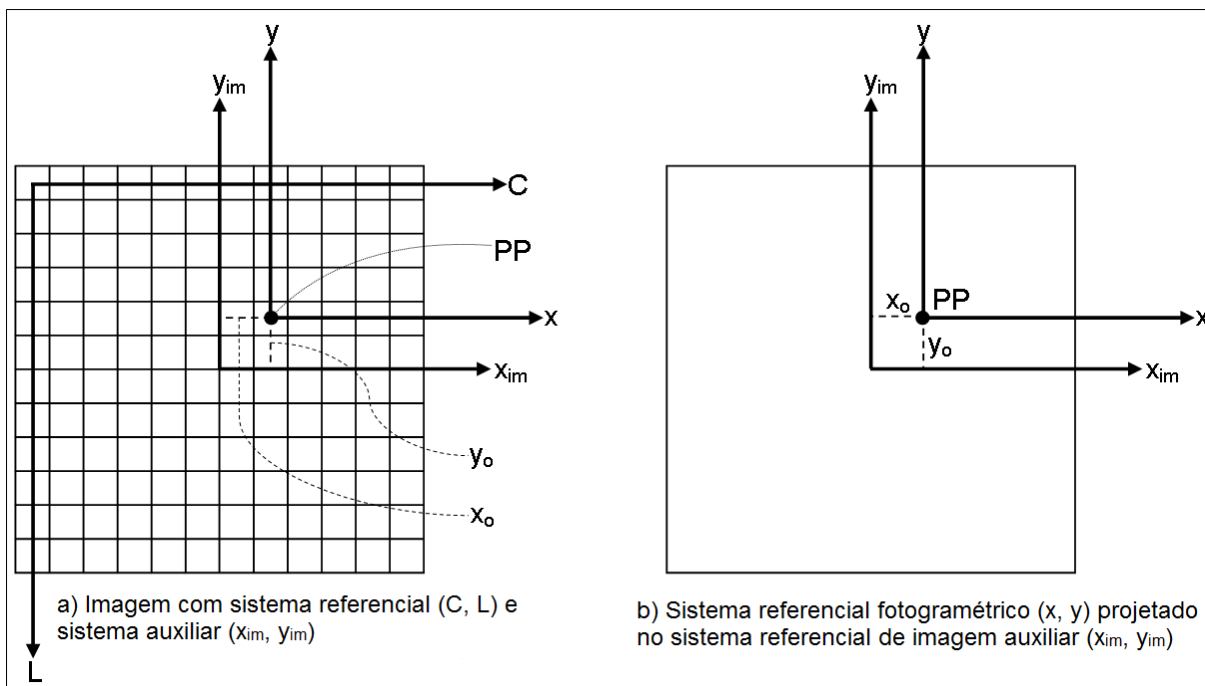


FIGURA 2.20 – Sistemas de coordenadas utilizados em imagens
 FONTE: Adaptado de MACHADO (2006)

A partir do sistema referencial de imagem dextrógiro com origem no centro da imagem e do sistema referencial fotogramétrico projetado, com origem no PP, são estabelecidas as relações entre os sistemas de acordo com as Equações (2.27) e (2.28).

$$x_{im} = (x - x_0) \quad (2.27)$$

$$y_{im} = (y - y_0) \quad (2.28)$$

onde:

x_0, y_0 – São as coordenadas do ponto principal no sistema referencial de imagem (píxeis);

x, y – Coordenadas dos pontos no sistema referencial fotogramétrico projetado na imagem (píxeis).

Os valores das coordenadas dos pontos do sistema fotogramétrico projetado na imagem estão em píxeis. A transformação destes valores para milímetros pode ser feita multiplicando estas coordenadas pelo tamanho efetivo do pixel nas direções x e y da imagem, conforme as Equações (2.29) e (2.30).

$$x = x_{im} \cdot P_x \quad (2.29)$$

$$y = y_{im} \cdot P_y \quad (2.30)$$

onde:

x, y – São as coordenadas dos pontos no sistema fotogramétrico projetado na imagem (milímetros);

P_x, P_y – Tamanho efetivo dos píxeis nas direções x e y (milímetros).

O tamanho efetivo dos píxeis nas direções x e y são calculados a partir do fator de escala nestas direções, conforme Equações (2.31) e (2.32).

$$P_x = P \cdot s_x \quad (2.31)$$

$$P_y = P \cdot s_y \quad (2.32)$$

onde:

P_x, P_y – Tamanho efetivo dos píxeis nas direções x e y (milímetros);

P – Dimensão do pixel obtida no manual do equipamento (milímetros);

s_x, s_y – Fatores de escala dos píxeis nas direções x e y .

Os fatores de escala dos píxeis nas direções x e y podem ser calculados através das Equações (2.33) e (2.34).

$$s_x = \frac{f}{f_x} \quad (2.33)$$

$$s_y = \frac{f}{f_y} \quad (2.34)$$

onde:

s_x, s_y – Fatores de escala dos píxeis nas direções x e y ;

f_x, f_y – Distância focal da câmara ao longo dos eixos x e y (milímetros);

f – Distância focal da câmara obtida no manual do equipamento (milímetros).

Quando o valor da distância focal f_x obtido com a calibração da câmara difere do valor f_y tem-se um indicativo de escalas diferentes nos eixos x e y da imagem.

Realizadas as etapas de Orientação Interior da imagem podem-se calcular as coordenadas 3D dos pontos. O posicionamento de cada ponto depende da precisão na determinação dos ângulos verticais e horizontais no sistema referencial de imagem. A projeção ortogonal das distâncias dos pontos, coordenada Z , pode ser feita através da Equação (2.35).

$$Z = d_r \cdot \cos \beta \quad (2.35)$$

onde:

Z – Distância ortogonal do CP ao ponto observado no espaço objeto;

d_r – Distância radial do CP ao ponto no sistema referencial esférico;

β – Ângulo formado entre o eixo que atinge o ponto na imagem partindo do CP e o eixo principal da câmara (CP-PP).

O ângulo β pode ser calculado através da função trigonométrica expressa com a Equação (2.36).

$$\tan \beta = \sqrt{\frac{x^2}{f_x^2} + \frac{y^2}{f_y^2}} \quad (2.36)$$

onde:

f_x, f_y – Distância focal da câmara ao longo dos eixos x e y (milímetros);

x, y – Coordenadas dos pontos no sistema referencial fotogramétrico projetado na imagem (milímetros).

A Expressão (2.35) relaciona a distância radial d_r com a coordenada Z dos pontos no sistema ortogonal 3D em função do ângulo β . Substituindo a Equação (2.36) na Equação (2.35) podemos explicitar a coordenada Z em função das distâncias focais da câmara e das coordenadas dos pontos no sistema referencial fotogramétrico projetado na imagem, conforme Equação (2.37).

$$Z = d_r \cdot \cos\left(\tan^{-1}\left(\sqrt{\frac{x^2}{f_x^2} + \frac{y^2}{f_y^2}}\right)\right) \quad (2.37)$$

onde:

Z – Distância ortogonal do CP ao ponto (milímetros);

d_r – Distância radial do CP ao ponto no sistema esférico da câmara (milímetros);

f_x, f_y – Distância focal da câmara ao longo dos eixos x e y (milímetros);

x, y – Coordenadas dos pontos no sistema referencial fotogramétrico projetado na imagem (milímetros).

As coordenadas (X, Y) dos pontos no sistema referencial ortogonal podem então serem calculadas através das Equações (2.38) e (2.39).

$$X = x \cdot \frac{Z}{f_x} \quad (2.38)$$

$$Y = y \cdot \frac{Z}{f_y} \quad (2.39)$$

2.8 REFINAMENTO DA NUVEM DE PONTOS 3D

O processo de refinamento da nuvem de pontos 3D obtida com a imagem TOF compreende a filtragem dos pontos que estejam esparsos devido à presença de ruído no arquivo de distâncias da imagem TOF. Com a Figura 2.21a são ilustrados pontos que não pertencem às superfícies do objeto, aparecem na aresta superior direita do objeto. O sinal emitido atinge uma área da superfície do objeto e não apenas um ponto. Esta área é proporcional à distância entre o alvo e o sensor, ocorre devido à divergência do feixe de luz emitido. Com o princípio TOF o valor da distância calculada é resultado da integração do sinal recebido, de acordo com a área iluminada da superfície. Quando o sinal emitido atinge superfícies não coplanares, o valor de distância armazenado é um resultado interpolado. Este fenômeno ocorre principalmente nas bordas dos objetos e pode ser visto com a

Figura 2.21a, que mostra um objeto com três superfícies planas: uma base, um plano vertical na direita e um plano na parte superior.

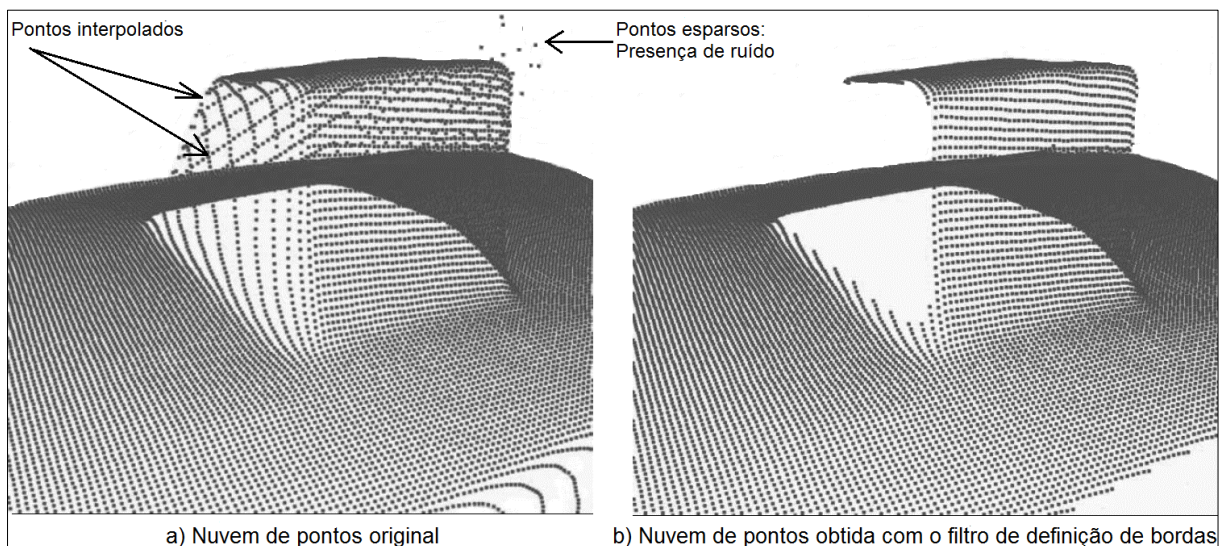


FIGURA 2.21 – Filtro para a definição de bordas do objeto
 FONTE: MAY *et al.* (2008)

A Figura 2.21b apresenta a nuvem de pontos 3D após a aplicação do filtro para o refinamento. Este é um filtro gaussiano utilizado para a definição de bordas e desníveis dos objetos, é também uma ferramenta para a remoção de pontos esparsos provenientes da presença de ruído nos dados da imagem TOF. Funciona considerando o ângulo formado entre dois píxeis adjacentes na imagem, onde o CP é o ponto que completa o triângulo, sendo o critério de seleção utilizado a distância média dos k pontos vizinhos mais próximos.

De acordo com May *et al.* (2008) a distância medida a partir de câmaras TOF pode ser afetada pelo efeito de arredondamento das bordas. Isto ocorre pela suavização causada com a transição entre as superfícies iluminadas. Dado um conjunto de pontos 3D, $P = \{p_i | p_i \in \mathbb{R}^3, i = 1, \dots, N_p\}$, as bordas podem ser detectadas utilizando a Equação (2.40). Esta é uma comparação do ângulo entre dois píxeis $\xi_{i,n}$, com base em um triângulo formado pelo centro perspectivo $f = 0$, o ponto p_i e a vizinhança deste ponto $P_n = \{p_{i,n} | n = 1, \dots, 8\}$, com o ângulo de vizinhança ξ_{th} .

$$\xi_i = \max \arcsin \left(\frac{\|p_{i,n}\|}{\|p_{i,n} - p_i\|} \cdot \sin \varphi \right) \quad (2.40)$$

$$J = \{p_i | \xi_i > \xi_{th}\} \quad (2.41)$$

onde:

φ – Ângulo máximo entre dois píxeis, vértice do triângulo no ponto $f = 0$.

O triângulo utilizado como referência no filtro para a detecção de bordas, com vértice no ponto $f = 0$, é ilustrado com a Figura 2.22.

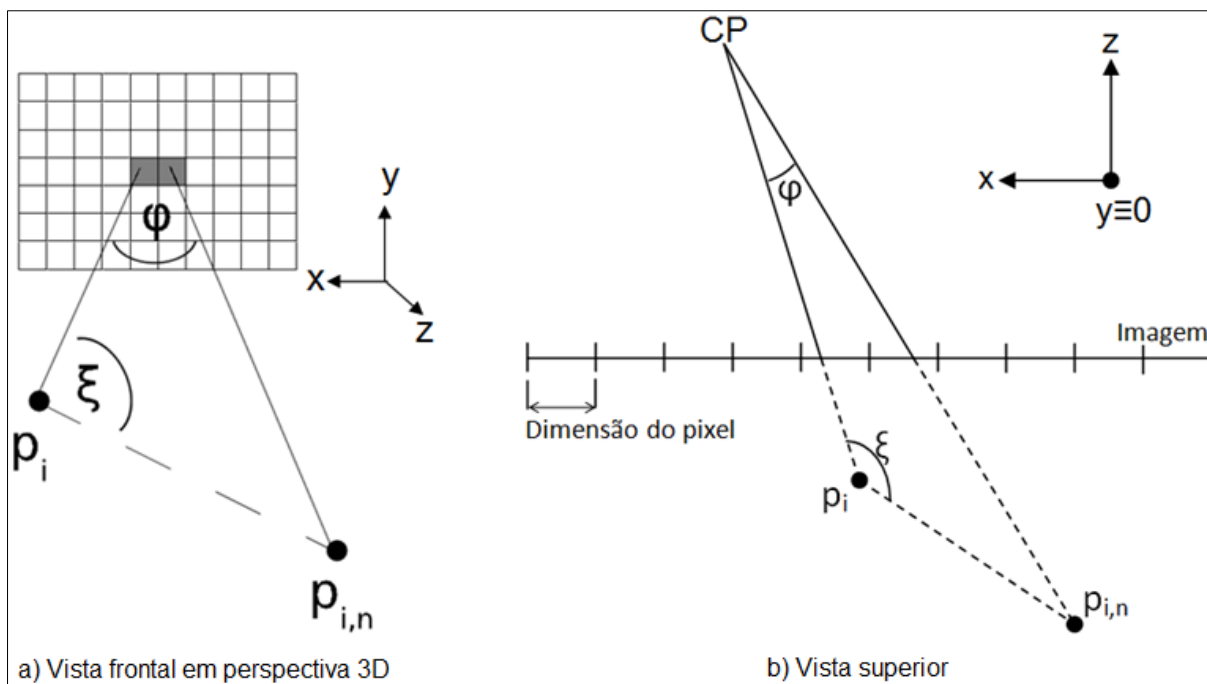


FIGURA 2.22 – Geometria do filtro para a definição de bordas
 FONTE: MAY *et al.* (2008)

Um conjunto S de pontos pode ser filtrado através da condição expressa com a Equação (2.43).

$$d(p_i) = \frac{1}{k} \sum_{n=1}^k \|(p_i - p_{i,n})\| \quad (2.42)$$

$$S = \{p_i \in P | d(p_i) < d_{th}\} \quad (2.43)$$

onde:

d_{th} – Distância de vizinhança constante.

O conjunto Q de pontos selecionados são os pontos filtrados da nuvem 3D, conforme a condição da Equação (2.44).

$$Q = \{q_i | q_i \in P \setminus (J \cup S)\} \quad (2.44)$$

2.9 ANÁLISE DE SUPERFÍCIES POR AUTOVALORES E AUTOVETORES

A análise da forma de superfícies pode ser feita pela variação local de autovalores que possibilita a classificação e segmentação de pontos com coordenadas tridimensionais (BELTON e LICHTI, 2006).

Autovetores e seus respectivos autovalores podem ser obtidos a partir da Matriz de Variâncias e Covariâncias (*MVC*) de um conjunto de observações. O tamanho relativo e a direção dos autovetores podem indicar propriedades locais desta superfície permitindo analisar sua forma (PAULY *et al.*, 2002).

De acordo com Johnson e Wichern (1998) a *MVC* pode ser calculada através da Equação (2.45).

$$MVC_{3 \times 3} = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k [\vec{r}_i - \vec{\bar{r}}] \cdot [\vec{r}_i - \vec{\bar{r}}]^T = \begin{bmatrix} \sigma_x^2 & \sigma_{xy} & \sigma_{xz} \\ \sigma_{xy} & \sigma_y^2 & \sigma_{yz} \\ \sigma_{xz} & \sigma_{yz} & \sigma_z^2 \end{bmatrix} \quad (2.45)$$

onde:

MVC – Matriz de Variâncias e Covariâncias;

\vec{r}_i – Vetor com as coordenadas 3D do ponto em questão na amostra;

$\vec{\bar{r}}$ – Vetor com as coordenadas do centróide da superfície;

$\sigma_x^2, \sigma_y^2, \sigma_z^2$ – Variâncias;

$\sigma_{xy}, \sigma_{xz}, \sigma_{yz}$ – Covariâncias;

k – Número de pontos da amostra.

O vetor com as coordenadas do *i*-ésimo ponto da amostra é denotado com \vec{r}_i pela Expressão (2.46). A posição relativa do centróide pode ser calculada através da Equação (2.47).

$$\vec{r}_i = [x_i \quad y_i \quad z_i]^T \quad (2.46)$$

$$\vec{\bar{r}} = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k \vec{r}_i \quad (2.47)$$

A MVC é quadrada, simétrica, positiva-semidefinida e pode ser decomposta em autovetores \vec{e} e autovalores λ através da Equação (2.48). Os autovalores λ_i são elementos escalares associados aos respectivos autovetores \vec{e}_i (LEON, 1998).

$$MVC \cdot \vec{e} = \lambda \cdot \vec{e} \quad (2.48)$$

A partir do teorema de decomposição espectral (decomposição de Jordan) a MVC pode ser isolada nesta igualdade, conforme a Equação (2.49). Maiores detalhes podem ser vistos em Johnson e Wichern (1998) e Shakarji (1998).

$$MVC = \sum_{i=0}^2 \lambda_i \cdot \vec{e}_i \cdot \vec{e}_i^T \quad (2.49)$$

onde:

MVC – Matriz Variância Covariância;

\vec{e}_i – Vetor com os autovetores \vec{e}_i ;

λ_i – Matriz com os autovalores λ_i .

Os autovalores são valores reais e os autovetores formam um sistema de base ortogonal, que correspondem aos componentes principais do conjunto de observações (BELTON, 2008).

De acordo com PAULY *et al.* (2002) pode-se adotar a convenção entre os autovalores da Expressão (2.50). A partir desta convenção algumas propriedades para superfícies normais podem ser descritas.

$$\lambda_1 \geq \lambda_2 \geq \lambda_3 \quad (2.50)$$

Em um conjunto de pontos 3D que formam uma superfície plana, espera-se que $\lambda_1 \neq 0$, $\lambda_2 \neq 0$ e que $\lambda_3 \approx 0$. Com isto, o menor autovetor \vec{e}_3 apontará na direção normal a esta superfície. Com a Figura 2.23 são ilustrados os três autovetores de uma região da superfície descrita pela nuvem de pontos 3D. O terceiro autovetor \vec{e}_3 , com o menor autovalor λ_3 , é ortogonal à superfície plana definida pelos outros dois autovetores \vec{e}_1 e \vec{e}_2 .

2.10 ANÁLISE DE SUPERFÍCIES POR MOMENTOS INVARIANTES

Características de superfícies planas podem ser obtidas através da análise de momentos invariantes, para isto utiliza-se a *MVC* dos pontos que descrevem esta superfície. De acordo com MASS e VOSSSELMAN (1999), os momentos invariantes m_{ij} podem ser calculados através da Equação (2.53).

$$m_{ij} = \int_{x_1}^{x_2} \int_{y_1}^{y_2} x^i y^j f(x, y) dx dy \quad (2.53)$$

onde:

i, j – Correspondem à ordem do momento;

$f(x, y)$ – A coordenada z dos pontos é função das coordenadas planas x e y em um conjunto de pontos que descrevem a superfície contínua.

A Equação (2.54) permite determinar o volume de uma esfera unitária com raio R em um domínio contínuo N de pontos 3D, é obtida a partir da Equação (2.53) e possibilita o estudo de propriedades das superfícies com padrão planar.

$$m_{ijk} = \int_V x^i y^j z^k f(x, y, z) dv \quad (2.54)$$


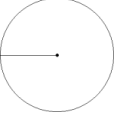
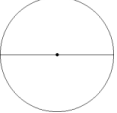
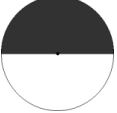



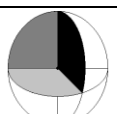
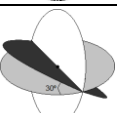
onde:

i, j, k – Pertencem ao domínio contínuo da função com N pontos;

$i + j + k$ – Corresponde à ordem do momento;

$f(x, y, z)$ – É o volume da esfera unitária.

Através da Equação (2.54) GROSS e THONNESSEN (2006) conseguiram descrever algumas relações entre autovalores e as propriedades de superfícies normais, conforme é ilustrado com o Quadro 2.3.

ESTRUTURA		AUTOVALORES		
		λ_1	λ_2	λ_3
	PONTO ISOLADO	0	0	0
	PONTO FINAL DE SEGMENTO DE RETA	$\frac{1}{12} = 0,083$	0	0
	LINHA RETA	$\frac{1}{3} = 0,333$	0	0
	1/2 PLANO	$\frac{1}{4} = 0,25$	$\frac{1}{4} \left(1 - \frac{64}{9\pi^2}\right) = 0,0$	0
	PLANO	$\frac{1}{4} = 0,25$	$\frac{1}{4} = 0,25$	0
	1/4 PLANO	$\frac{1}{4} \left(1 - \frac{2}{\pi}\right) = 0,09$	$\frac{1}{4} + \frac{2}{\pi} - \frac{32}{9\pi^2} = 0,0$	0
	INTERSEÇÃO DE 2 PLANOS	$\frac{1}{3} = 0,333$	$\frac{1}{8} = 0,125$	$\frac{1}{8} - \frac{8}{9\pi^2} = 0,03$
	INTERSEÇÃO DE 3 PLANOS	$\frac{1}{6} \left(1 - \frac{1}{\pi}\right) = 0,11$	$\frac{1}{6} \left(1 - \frac{1}{\pi}\right) = 0,11$	$\frac{1}{6} \left(1 + \frac{2}{\pi}\right) - \frac{2^6}{3^3\pi^2} = 0,03$
	INTERSEÇÃO DE 2 PLANOS À 30°	0,25	0,1875	0,01747

QUADRO 2.3 – Propriedades de superfícies normais obtidas com autovalores
 FONTE: GROSS e THOENNESSEN (2006)

Os autovalores do Quadro 2.3 foram determinados analiticamente a partir da Equação (2.54) e podem ser utilizados como referência para a estimação da forma das superfícies que compõem a estrutura dos objetos.

Restringindo a ordem dos momentos com $i + j + k \leq 2$, pode-se calcular o centro de gravidade da superfície conforme a Equação (2.55) e os elementos da MVC podem ser obtidos através da Equação (2.56).

$$\bar{x} = \frac{m_{100}}{m_{000}}; \bar{y} = \frac{m_{010}}{m_{000}}; \bar{z} = \frac{m_{001}}{m_{000}} \quad (2.55)$$

$$\bar{m}_{ijk} = \int_V (x_i - \bar{x})^i (y - \bar{y})^j (z - \bar{z})^k f(x, y, z) dv \quad (2.56)$$

Os momentos de 2ª ordem normalizados para os pontos 3D em um domínio discreto podem ser calculados através da Equação (2.57).

$$\tilde{m}_{ijk} = \frac{\sum_{l=1}^N (x_l - \bar{x})^i (y_l - \bar{y})^j (z_l - \bar{z})^k}{R^{i+j+k} N} \quad (2.57)$$

onde:

\tilde{m}_{ijk} – Momentos de 2ª ordem para os pontos 3D;

N – Número de pontos da amostra no domínio contínuo da função;

R – Raio da esfera unitária considerada para seleção de pontos.

Desta forma, os valores calculados para os momentos não são influenciados pelo número de pontos, unidade física das medidas ou peso dos elementos da *MVC*. Utilizando momentos de 2ª ordem, a *MVC* pode ser obtida através da Equação (2.58).

$$MVC = \begin{pmatrix} \tilde{m}_{200} & \tilde{m}_{110} & \tilde{m}_{101} \\ \tilde{m}_{110} & \tilde{m}_{020} & \tilde{m}_{011} \\ \tilde{m}_{101} & \tilde{m}_{011} & \tilde{m}_{002} \end{pmatrix} \quad (2.58)$$

O cálculo dos autovalores λ_i e autovetores \vec{e}_i , com $i = 1,2,3$, é variável para cada ponto do conjunto de observações. Sendo assim, as classes de valores geradas por GROSS e THONNESSEN (2006) com objetivo de modelar superfícies com padrão planar, foram às seguintes:

- O primeiro autovalor λ_1 foi definido constante e igual a 0,25;
- O segundo autovalor λ_2 varia de 0,125 à 0,25;
- O terceiro autovalor λ_3 varia de 0 à 0,125.

Com a aproximação teórica dos valores contidos no Quadro 2.4, JUTZI e GROSS (2009) mostraram a possibilidade de determinar matematicamente inclinações entre as superfícies para os ângulos de 0°, 30° e 90°. No entanto, quando são utilizados dados reais para representar as superfícies, pequenas variações nestes valores podem ser percebidas. Um exemplo é que o terceiro

autovalor λ_3 não terá valor igual a zero, mesmo em uma superfície plana. Isto ocorre por haverem pequenos desvios entre os pontos desta superfície que são causados por ruído presente no conjunto de dados reais. Este fato pode ser observado calculando o terceiro autovalor, que será um valor positivo pequeno, mas diferente de zero. Com isto, quanto mais próximo de zero o terceiro autovalor λ_3 maior será o indicativo que a superfície é plana, conforme ilustrado com a Figura 2.24.

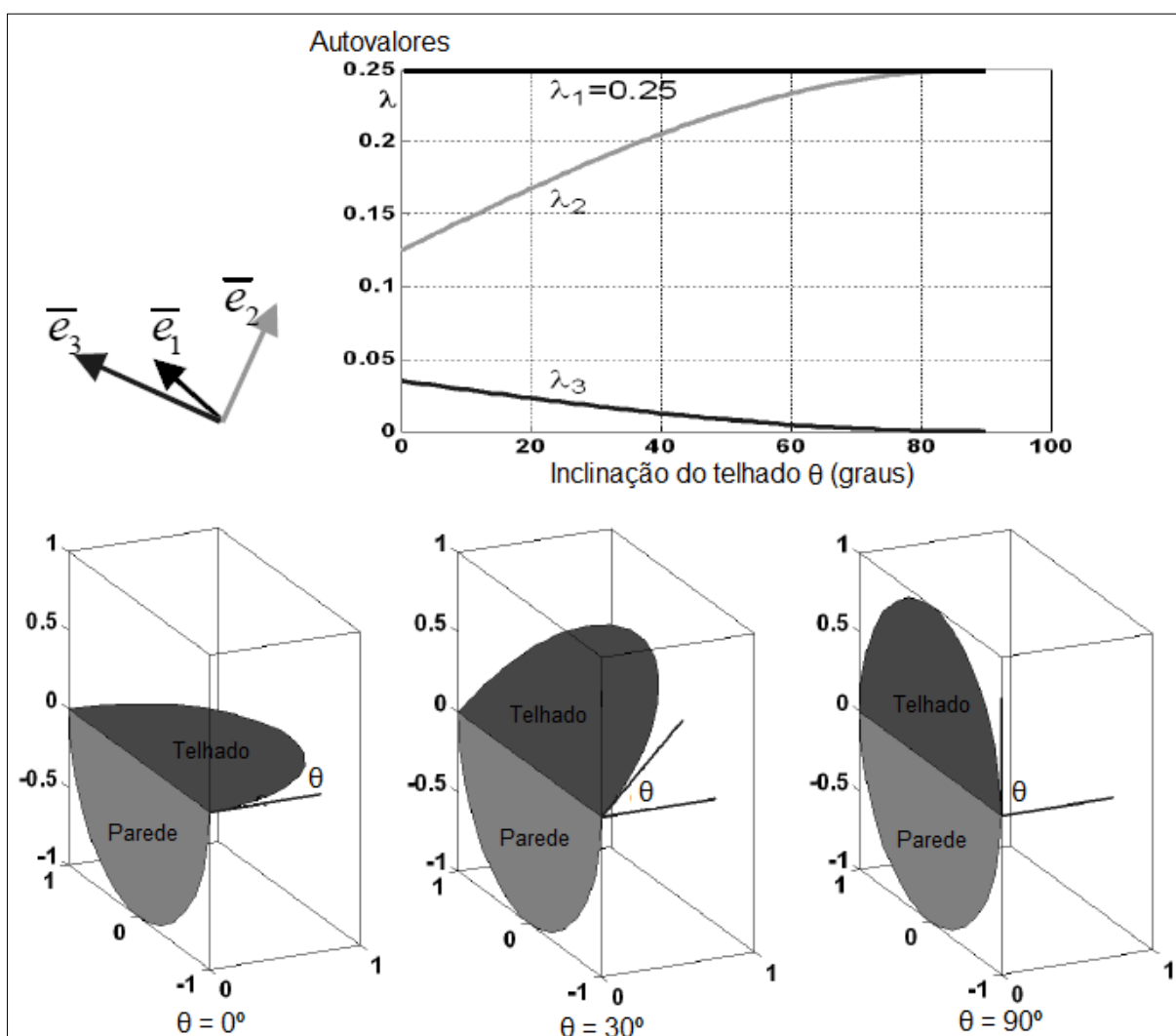


FIGURA 2.24 – Inclinações de superfícies determinadas por autovalores
 FONTE: JUTZI e GROSS (2009)

2.11 ALGORITMO DE DESLOCAMENTO PELA MÉDIA

O algoritmo de deslocamento pela média (*Mean Shift*) pode ser utilizado no reconhecimento de padrões para a segmentação de imagens. A densidade de pontos vizinhos em relação a um ponto central pode ser estimada com a média do conjunto de dados discretos. A análise espacial de atributos é utilizada neste contexto com o objetivo de extrair informações. Para isto, utiliza a vizinhança de um ponto na imagem. Com os atributos definidos pode-se encontrar o centro das regiões com as maiores densidades que representam características significativas dos objetos presentes na imagem.

Para realizar a análise espacial de atributos e obterem-se resultados satisfatórios, deve-se reduzir o volume de dados até que se tenham apenas as características significativas distribuídas em um sistema de coordenadas contínuo. O conteúdo do espaço de atributos deve ser passível de modelagem através de uma amostragem com distribuição multivariada de probabilidade. Devido a este pressuposto, é necessário verificar se a condição de normalidade dos dados é satisfeita em aplicações estatísticas tradicionais que utilizam testes paramétricos.

Em outras aplicações podem-se utilizar métodos estatísticos não paramétricos, com menos restrições sobre o comportamento dos dados como, por exemplo, não se preocupar com o tipo de distribuição para as variáveis aleatórias. O conceito de *Kernel* pode ser empregado em métodos não paramétricos para a estimativa de propriedades. Esta é uma função estatística contínua, simétrica e com limite superior e inferior de integração definidos, cuja integração resulta na unidade por conveniência. O *Kernel* atua na imagem como uma janela de convolução suavizando as características dos pontos analisados (MACHADO, 2006).

De acordo com COMANICIU e MEER (2002) o algoritmo de deslocamento pela média é uma ferramenta versátil para análises espaciais de feições presentes em amostras. Utiliza o *Kernel* para a estimação da densidade dos elementos no conjunto de dados, tendo como referência um ponto fixo na região central da amostra. Dado um conjunto de pontos $\mathbf{x}_{i=1,\dots,n}$ em um espaço R com dimensão d , o estimador de densidade multivariada por *Kernel* $K(\mathbf{x})$ e a matriz de parâmetros H com bandas de dimensão d , pode ser calculada com os pontos \mathbf{x} . Com estes

parâmetros definidos, a função para estimar a densidade multivariada no ponto \mathbf{x} é expressa com a Equação (2.59).

$$\hat{f}(\mathbf{x}) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n K_H(\mathbf{x} - \mathbf{x}_i) \quad (2.59)$$

$$K_H(\mathbf{x}) = [H]^{-\frac{1}{2}} K(H^{-\frac{1}{2}} \mathbf{x}) \quad (2.60)$$

O *Kernel* $K(\mathbf{x})$ com dimensão d é uma função para a análise da densidade da vizinhança dos pontos, expressa através das Equações (2.61) e (2.62).

$$\int_{R^d} K(\mathbf{x}) d\mathbf{x} = 1, \quad \lim_{\|\mathbf{x}\| \rightarrow \infty} \|\mathbf{x}\|^d K(\mathbf{x}) = 0 \quad (2.61)$$

$$\int_{R^d} \mathbf{x} K(\mathbf{x}) d\mathbf{x} = 0, \quad \int_{R^d} \mathbf{x} \mathbf{x}^T K(\mathbf{x}) d\mathbf{x} = c_K I \quad (2.62)$$

Onde c_K é uma constante. A partir do *Kernel* univariado $K_1(x)$ o *Kernel* multivariado pode ser calculado de duas maneiras, conforme as Equações (2.63) e (2.64).

$$K^P(\mathbf{x}) = \prod_{i=1}^d K_1(x_i) \quad (2.63)$$

$$K^S(\mathbf{x}) = a_{k,d} K_1(\|\mathbf{x}_i\|) \quad (2.64)$$

Onde $K^P(\mathbf{x})$ é obtido com o produto dos *Kernels* univariados e $K^S(\mathbf{x})$ é obtido rotacionando $K_1(x)$ no espaço R^d , o que faz $K^S(\mathbf{x})$ ser radialmente simétrico. A constante $a_{k,d}^{-1} = \int_{R^d} K_1(\|\mathbf{x}\|) d\mathbf{x}$ com $K^S(x)$ integrado de 0 à 1. O *Kernel* radialmente simétrico é de interesse em análises espaciais de imagens, desde que satisfaça a condição da Equação (2.65).

$$K(x) = c_{k,d} k(\|\mathbf{x}\|^2) \quad (2.65)$$

Neste caso define-se a função de cada elemento do *Kernel* $k(x)$ para $x \geq 0$. A constante de normalização $c_{k,d}$ pode ser calculada integrando $K(\mathbf{x})$ de 0 a 1, assumindo-se que é positiva. A estimação pode ser parametrizada com a matriz diagonal de bandas do *Kernel* $H = h^2 I = \text{diag}[h_1^2, \dots, h_d^2]$, onde I é a matriz identidade com dimensão d . Esta matriz apresenta a vantagem de ser determinada

utilizando como único parâmetro o número de bandas $h \geq 0$ do *Kernel*. Empregando parâmetros com o número de bandas h e dimensão n , o estimador de densidade por *Kernel* da Equação (2.59) pode ser expresso através da Equação (2.66).

$$\hat{f}(\mathbb{X}) = \frac{1}{nh^d} \sum_{i=1}^n K_H \left(\frac{\mathbb{x} - \mathbb{x}_i}{h} \right) \quad (2.66)$$

A qualidade do estimador de densidade por *Kernel* pode ser analisada através do erro médio quadrático entre a densidade real e a estimada. Na prática, somente a aproximação assintótica das medidas pode ser calculada (AMISE – *Asymptotic Mean Integrated Square Error*). Para os *Kernels* multivariados, o erro médio quadrático AMISE é minimizado utilizando o *Kernel* de Epanechnikov (COMANICIU e MEER, 2002).

$$k_E(x) = \begin{cases} 1 - x & 0 \leq x \leq 1 \\ 0, & x > 0 \end{cases} \quad (2.67)$$

$$K_E(\mathbb{X}) = \begin{cases} \frac{1}{2} c_d^{-1} (d + 2) (1 - \|\mathbb{X}\|^2) & \|\mathbb{X}\| \leq 1 \\ 0, & \text{caso contrário} \end{cases} \quad (2.68)$$

Onde c_d é o volume de uma esfera com raio unitário e com dimensão d . O elemento do *Kernel* $k_N(x)$ pode ser calculado utilizando a Equação (2.69).

$$k_N(x) = \exp\left(-\frac{1}{2}x\right), \quad x \geq 0 \quad (2.69)$$

Para o *Kernel* multivariado calculado com a Equação (2.69), um *Kernel* normal K_N pode ser calculado utilizando a Equação (2.70).

$$K_N(\mathbb{X}) = (2\pi)^{-d/2} \exp\left(-\frac{1}{2}\|\mathbb{X}\|^2\right) \quad (2.70)$$

Sendo o *Kernel* normal simétrico e admitido finito. Para a análise espacial de imagens estas duas formas de calcular o *Kernel* são suficientes, e os resultados obtidos com estas condições impostas são satisfatórios. O estimador de densidade por *Kernel* da Equação (2.59) pode ser reescrito conforme a Equação (2.71).

$$\hat{f}_{h,K}(\mathbb{X}) = \frac{c_{k,d}}{nh^d} \sum_{i=1}^n k\left(\left\|\frac{\mathbb{X}-\mathbb{X}_i}{h}\right\|^2\right) \quad (2.71)$$

Para análise de feições espaciais primeiramente deve-se calcular a densidade do conjunto de dados e verificar o seu comportamento espacial. Isto pode ser feito calculando o gradiente da função de densidade $f(\mathbb{X})$ igual a zero $\nabla f(\mathbb{X}) = 0$. O algoritmo de deslocamento pela média é uma maneira de localizar estes zeros para estimar a densidade do conjunto de observações. Calculando o gradiente da função expressa com a Equação (2.71) pode-se estimar a densidade através da Equação (2.72).

$$\hat{\nabla} f_{h,K}(\mathbb{X}) \equiv \frac{2c_{k,d}}{nh^{d+2}} \sum_{i=1}^n (\mathbb{X} - \mathbb{X}_i) k'\left(\left\|\frac{\mathbb{X}-\mathbb{X}_i}{h}\right\|^2\right) \quad (2.72)$$

Substituindo k' pela função $g(x)$, conforme expresso com a Equação (2.73).

$$g(x) = k'(x) \quad (2.73)$$

Assumindo que a derivada do *Kernel* k exista para o conjunto finito de pontos $x \in [0, \infty)$. O *Kernel* $G(x)$ com seus elementos $g(x)$ pode ser definido através da Equação (2.74).

$$G(x) = c_{g,d} g(\|\mathbb{X}\|^2) \quad (2.74)$$

Onde $c_{g,d}$ corresponde a uma constante de normalização. O *Kernel* $G(x)$ pode ser considerado uma aproximação do *Kernel* $K(x)$, dependendo do contexto em que será empregado. De forma similar, o *Kernel* de Epanechnikov é uma simplificação do *Kernel* uniforme da esfera unitária com dimensão d . Introduzindo $g(x)$ na Equação (2.72), tem-se a Equação (2.75).

$$\hat{\nabla} f_{h,K}(\mathbb{X}) = \frac{2c_{k,d}}{nh^{d+2}} \sum_{i=1}^n (\mathbb{X} - \mathbb{X}_i) g\left(\left\|\frac{\mathbb{X}-\mathbb{X}_i}{h}\right\|^2\right) \quad (2.75)$$

$$\hat{\nabla} f_{h,K}(\mathbb{X}) = \frac{2c_{k,d}}{nh^{d+2}} \left[\sum_{i=1}^n g\left(\left\|\frac{\mathbb{X}-\mathbb{X}_i}{h}\right\|^2\right) \right] \cdot \left[\frac{\sum_{i=1}^n \mathbb{X}_i g\left(\left\|\frac{\mathbb{X}-\mathbb{X}_i}{h}\right\|^2\right)}{\sum_{i=1}^n g\left(\left\|\frac{\mathbb{X}-\mathbb{X}_i}{h}\right\|^2\right)} \right] \quad (2.76)$$

$$\sum_{i=1}^n g\left(\left\|\frac{\mathbf{x}-\mathbf{x}_i}{h}\right\|^2\right) \quad (2.77)$$

Considerando que o resultado da função expressa com a Equação (2.77) é um número positivo. O primeiro termo da Equação (2.76) é proporcional à densidade estimada calculada para \mathbf{x} com o *Kernel* G , conforme Equação (2.71) e expresso agora em função de $g(x)$ através da Equação (2.78).

$$f_{h,G}(\mathbf{x}) = \frac{c_{g,d}}{nh^d} \sum_{i=1}^n g\left(\left\|\frac{\mathbf{x}-\mathbf{x}_i}{h}\right\|^2\right) \quad (2.78)$$

O segundo termo da Equação (2.76) corresponde ao algoritmo de deslocamento pela média, conforme Equação (2.79).

$$m_{h,G}(\mathbf{x}) = \frac{\sum_{i=1}^n \mathbf{x}_i g\left(\left\|\frac{\mathbf{x}-\mathbf{x}_i}{h}\right\|^2\right)}{\sum_{i=1}^n g\left(\left\|\frac{\mathbf{x}-\mathbf{x}_i}{h}\right\|^2\right)} - \mathbf{x} \quad (2.79)$$

A Equação (2.79) representa a diferença entre as médias ponderadas, utilizando o *Kernel* G para os pesos e o centro da janela de convolução em \mathbf{x} . A partir das Equações (2.76), (2.78) e (2.79) chega-se as Equações (2.80) e (2.81).

$$\widehat{\nabla} f_{h,K}(\mathbf{x}) = \widehat{f}_{h,G}(\mathbf{x}) \frac{2c_{k,d}}{h^2 c_{g,d}} m_{h,G}(\mathbf{x}) \quad (2.80)$$

$$m_{h,G}(\mathbf{x}) = \frac{1}{2} h^2 c \widehat{\nabla} \frac{\widehat{f}_{h,K}(\mathbf{x})}{\widehat{f}_{h,G}(\mathbf{x})} \quad (2.81)$$

Para a posição \mathbf{x} o vetor de deslocamento pela média calculado com *Kernel* G é proporcional à estimação de densidade normalizada obtida, resolvendo a função com gradiente igual a zero e *Kernel* K . É a normalização da densidade estimada em x calculada com o *Kernel* G .

O vetor de deslocamento pela média aponta na direção de máximo crescimento da densidade do conjunto de dados. A estimação da densidade de pontos com mesma característica é obtida através de interações, com sucessivos cálculos do vetor de deslocamento pela média $m_{h,G}(\mathbf{x})$ e translações do *Kernel* $G(x)$ sobre a imagem. Isto garante a convergência ao redor do ponto de interesse,

utilizando a Equação (2.81) com gradiente igual a zero. Regiões com baixa densidade de observações não são interessantes para análises espaciais com o algoritmo de deslocamento pela média, pois muitas iterações seriam necessárias para obtenção de resultados pouco satisfatórios. De forma análoga, em locais com densidade máxima, poucas iterações são necessárias e a análise pode atingir bons resultados (COMANICIU e MEER, 2002).

Imagens são representadas matematicamente na forma de matrizes, onde cada posição da matriz é ocupada por vetores com dimensão p , onde $p = 1$ no caso de imagens em níveis de cinza ou coloridas e $p \geq 2$ no caso de imagens multiespectrais. O posicionamento de cada pixel na matriz imagem está contido no domínio espacial (*Spatial domain*) enquanto o valor digital do pixel faz parte do domínio de características da imagem (*Range domain*), assumindo-se estes domínios como espaços euclidianos. Deste modo, o *Kernel* multivariado pode ser definido como o produto de dois *Kernels* radialmente simétricos em um espaço euclidiano, calculado com um parâmetro de cada domínio através da Equação (2.82).

$$K_{h_s h_r}(x) = \frac{C}{h_s^2 h_r^p} k\left(\left\|\frac{x^s}{h_s}\right\|^2\right) k\left(\left\|\frac{x^r}{h_r}\right\|^2\right) \quad (2.82)$$

onde:

x^s – Corresponde ao domínio espacial;

x^r – Corresponde ao domínio de características;

$k(x)$ – Elemento da função calculado em ambos os domínios;

h_s, h_r – Parâmetros das bandas de cada domínio do *Kernel* empregado;

C – Constante de normalização entre as bandas.

Na prática o *Kernel* de Epanechnikov, também conhecido por *Kernel* normal, atinge resultados satisfatórios. O usuário deve escolher apenas os parâmetros das bandas $h = h_s, h_r$ e a quantidade mínima H de pixels das regiões segmentadas na imagem, determinando assim a resolução na estimação da densidade. A Figura 2.25 ilustra um exemplo de segmentação realizada utilizando o algoritmo de deslocamento pela média sobre uma imagem em níveis de cinza.

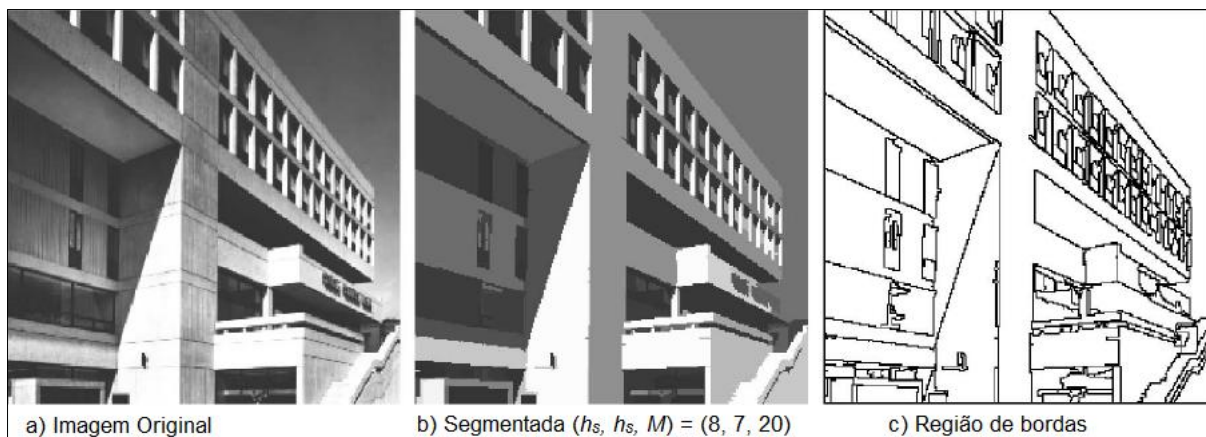


FIGURA 2.25 – Imagem segmentada
FONTE: COMANICIU e MEER (2002)

A segmentação de imagens através do algoritmo de deslocamento pela média foi implementada no *software* EDISON (*Edge Detection and Image SegmentatiON System*), desenvolvido pela Universidade RUTGER de *New Jersey*. Este *software*, além da segmentação com o algoritmo de deslocamento pela média, realiza uma filtragem preservando as discontinuidades e detectando os limites dos objetos contidos na imagem através de uma função gradiente (CHRISTOUDIAS *et al.*, 2002).

3 MATERIAIS

Neste trabalho foram utilizadas imagens TOF obtidas com a câmara PMD CamCube 2.0, que fornece dados de distância e intensidade sob forma de matrizes de imagem. Para realizar os experimentos, foram obtidos três conjuntos de imagens:

- De um gabarito com a forma de um tabuleiro de xadrez, para realizar o processo de calibração da câmara;
- De uma parede branca com padrão planar para análise de ruídos e distorções geométricas das imagens, e;
- Do objeto de estudo, uma caixa de papelão com superfícies planas e brancas.

Para o processamento das imagens TOF foi utilizado um microcomputador do laboratório de Fotogrametria e Sensoriamento Remoto, Departamento de Geomática da Universidade Federal do Paraná, com as seguintes características:

- Processador Intel® Core™2 Duo, 2,93GHz;
- Capacidade do disco rígido de 320GB;
- Memória principal de 2GB.

4 MÉTODOS

Neste capítulo descreve-se o desenvolvimento metodológico do presente trabalho de pesquisa para a aquisição e processamento da imagem TOF. Esta imagem é composta por dois arquivos. O primeiro arquivo contém informação de intensidade de retorno do sinal captado com iluminação infravermelha. O segundo arquivo contém informação de distância (*range*) para cada pixel gerado com o sensor da câmara TOF.

Considerando que as imagens TOF podem apresentar ruído em função das condições de iluminação e da natureza das superfícies dos objetos, estudos para a redução do ruído foram efetuados. Para isto, utilizaram-se janelas na região central da imagem, ao redor do pixel com coordenadas de imagem (102, 102). As filtragens foram realizadas em áreas que circundam este pixel central.

Após a análise do tempo de integração na aquisição da imagem determinaram-se POI através do processo de calibração da câmara. Os POI permitiram corrigir a geometria dos dados da imagem TOF. Esta correção é necessária devido às distorções causadas pelo sistema de lentes da câmara.

A etapa seguinte consistiu na segmentação da imagem TOF, onde duas metodologias foram avaliadas:

- 1) Segmentação do conjunto de dados por crescimento de regiões no espaço tridimensional, utilizando pontos semente escolhidos no arquivo de intensidades da imagem TOF como referência para o posicionamento (X, Y) dos pontos com distância (Z);

- 2) Segmentação utilizando a análise da variação local dos autovalores ao longo do arquivo de distâncias da imagem TOF. Realizada para a geração de uma imagem com bordas intensificadas, segmentação desta imagem através do algoritmo de deslocamento pela média e projeção ortogonal dos pontos pertencentes às áreas segmentadas. As superfícies segmentadas foram então separadas através do conjunto de pontos 3D.

O passo seguinte consistiu no cálculo das coordenadas tridimensionais dos pontos dos objetos imageados a partir da informação de distância, das coordenadas dos píxeis na imagem de intensidade e dos POI. Com isto, gerou-se a nuvem de pontos 3D e tornou-se possível a modelagem tridimensional das superfícies do

objeto de estudo, sendo também avaliado o resultado obtido. A Figura 4.1 apresenta as etapas realizadas no processamento das imagens TOF com as duas propostas de metodologia para a etapa de segmentação.

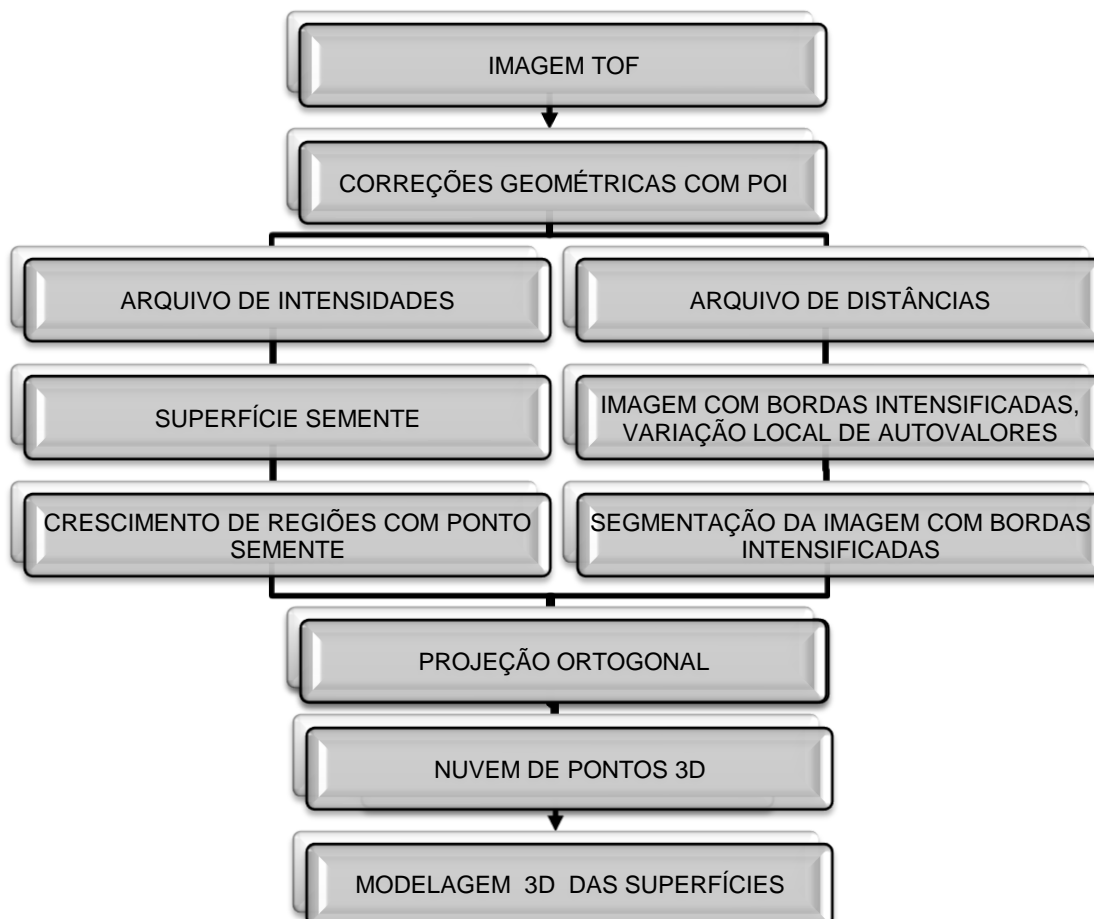


FIGURA 4.1 – Processamento da imagem TOF

4.1 CALIBRAÇÃO DA CÂMARA

A calibração foi realizada com o objetivo de determinar os Parâmetros de Orientação Interior (POI) da câmara. Estes parâmetros possibilitam a reconstrução do feixe perspectivo que gerou a imagem para o instante em que foi captada, permitindo a correção de sua geometria (ANDRADE, 1998).

Com o processo de Orientação Interior são obtidos os seguintes POI: distância focal calibrada (f_c); posição do Ponto Principal (x_0, y_0) na imagem; Distorção Radial Simétrica (K_1, K_2, K_3); Distorção Descentrada (P_1, P_2); e os parâmetros que indicam falta de afinidade do sensor (A, B).

Os POI obtidos com o processo de calibração possibilitam realizar correções geométricas nos arquivos de intensidades e distâncias das imagens TOF. Com a calibração objetiva-se corrigir as distorções ocorridas na passagem do raio de luz pelo sistema de lentes até atingir o plano focal. Este erro ocorre pela impossibilidade na construção de um sistema de lentes perfeito para a câmara. A correção dos erros sistemáticos da câmara é realizada no plano da imagem, no ponto onde uma linha reta passante pelo ponto nodal anterior do sistema de lentes é ortogonal a este plano.

O método de calibração fotogramétrica é o tradicionalmente utilizado na determinação dos POI em Ciências Geodésicas. Para isto, necessita de pontos de apoio com coordenadas tridimensionais conhecidas na superfície de objetos com correspondentes coordenadas bidimensionais observadas na imagem. Relaciona-se a informação 3D da cena com a informação 2D da imagem através das equações de colinearidade, fazendo-se uma correspondência entre a posição dos pontos de referência 3D e os mesmos pontos reconhecidos na imagem 2D. Esta calibração pode ser realizada de forma eficiente desde que sejam utilizadas técnicas e campos de calibração apropriados para cada tipo de câmara e aplicação que se destina a imagem. Outra técnica que pode ser utilizada para a Orientação Interior das imagens é conhecida como auto-calibração, na qual não há necessidade de pontos com coordenadas conhecidas no espaço objeto (ZHANG, 2000).

A Distorção Radial Simétrica é a parcela de refração não desejável que um feixe luminoso sofre ao atravessar um sistema de lentes. A Distorção Descentrada é composta pelas distorções Tangencial e Radial Assimétrica. É causada pela impossibilidade de alinhar-se perfeitamente o eixo óptico do sistema de lentes que compõe a objetiva. Correções para estas distorções podem ser feitas através da Equação (4.1). Maiores detalhes podem ser vistos em Andrade (1998).

$$\begin{bmatrix} x' \\ y' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix}_{obs} - \begin{bmatrix} x_0 \\ y_0 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \delta x \\ \delta y \end{bmatrix}_{rad} - \begin{bmatrix} \delta x \\ \delta y \end{bmatrix}_{des} - \begin{bmatrix} \delta x \\ \delta y \end{bmatrix}_a \quad (4.1)$$

onde:

$[x', y']^T$ – Coordenadas corrigidas no sistema referencial de imagem;

$[x, y]_{obs}^T$ – Coordenadas de imagem observadas;

$[x_0, y_0]^T$ – Coordenadas do PP no sistema referencial de imagem;

$[\delta x, \delta y]_{rad}^T$ – Distorção Radial Simétrica;

$[\delta x, \delta y]_{des}^T$ – Distorção Descentrada;

$[\delta x, \delta y]_a^T$ – Distorção causada pela falta de afinidade entre os eixos do

sensor.

Andrade (1998) ilustra algumas correções necessárias para as imagens utilizadas em Fotogrametria e mostra a influencia dos POI nestas correções. Um exemplo é a correção da distorção Radial Simétrica que pode ser realizada através das Equações (4.2) e (4.3).

$$\delta x_{rad} = (r^2 \cdot K_1 + r^4 \cdot K_2 + r^6 \cdot K_3) \cdot \bar{x} \quad (4.2)$$

$$\delta y_{rad} = (r^2 \cdot K_1 + r^4 \cdot K_2 + r^6 \cdot K_3) \cdot \bar{y} \quad (4.3)$$

onde:

$$\bar{x} = (x - x_0);$$

$$\bar{y} = (y - y_0);$$

x, y – Coordenadas dos pontos com distorções no sistema referencial fotogramétrico projetado na imagem;

x_0, y_0 – Coordenadas do Ponto Principal;

K_1, K_2, K_3 – Coeficientes de Distorção Radial Simétrica.

A distância r entre o ponto com coordenadas na imagem e o Ponto Principal pode ser calculada através da Equação (4.4).

$$r = \sqrt{\bar{x}^2 + \bar{y}^2} \quad (4.4)$$

A Distorção Descentrada pode então ser corrigida através das Equações (4.5) e (4.6).

$$\delta x_{des} = [P_1 \cdot (r^2 + 2 \cdot \bar{x}^2) + 2 \cdot P_2 \cdot \bar{x} \cdot \bar{y}] \cdot (1 + P_3 + r^2 + \dots) \quad (4.5)$$

$$\delta y_{des} = [2 \cdot P_1 \cdot \bar{x} \cdot \bar{y} + P_2 \cdot (r^2 + 2 \cdot \bar{y}^2)] \cdot (1 + P_3 + r^2 + \dots) \quad (4.6)$$

onde:

P_1, P_2, P_3 – Coeficientes de Distorção Descentrada.

A diferença de escala dos eixos horizontal e vertical da imagem, possível não ortogonalidade entre os elementos do sensor, pode ser modelada utilizando as Equações (4.7) e (4.8) que introduzem correções utilizando os parâmetros de afinidade A e B (HABIB e MORGAN, 2003).

$$\delta x_a = A(x - x_0) + B(y - y_0) \quad (4.7)$$

$$\delta y_a = B(y - y_0) \quad (4.8)$$

onde:

A, B – Parâmetros de afinidade;

x, y – Coordenadas dos pontos com distorções no sistema referencial fotogramétrico projetado na imagem;

x_0, y_0 – Coordenadas do Ponto Principal.

A partir da formulação proposta por Brown (1971) e incluindo os parâmetros de afinidade A e B as Equações (4.9) e (4.10) possibilitam a correção da imagem utilizando os coeficientes K_1, K_2, K_3 e P_1, P_2 .

$$x' = x + \bar{x} \cdot (K_1 r^2 + K_2 r^4 + K_3 r^6 + \dots) + [P_1 \cdot (r^2 + 2 \cdot \bar{x}^2) + 2 \cdot P_2 \cdot \bar{x} \cdot \bar{y}] \cdot [1 + P_3 \cdot r^2 + \dots] + \bar{x}A + \bar{y}B \quad (4.9)$$

$$y' = y + \bar{y} \cdot (K_1 r^2 + K_2 r^4 + K_3 r^6 + \dots) + [2P_1 \cdot \bar{x} \cdot \bar{y} + P_2 \cdot (r^2 + 2\bar{y}^2)] \cdot [1 + P_3 \cdot r^2 + \dots] + \bar{y}B \quad (4.10)$$

A Equação (4.1) ilustra as correções necessárias na geometria da imagem quando objetiva-se a extração de informações métricas. É um modelo já consagrado na Fotogrametria e bastante aplicado em Ciências Geodésicas. Pode ser utilizado para o entendimento das correções necessárias nas imagens devido às distorções causadas pelo sistema de lentes da câmara e pela falta de afinidade entre os elementos do sensor. Outros modelos matemáticos para correções geométricas de imagens são utilizados em áreas correlatas como a Visão Computacional. Com a precisão requerida em cada aplicação alguns POI têm maior relevância que outros, podendo haver a supressão de alguns. A correlação entre os parâmetros deve ser analisada e evitada.

As Equações (4.9) e (4.10) podem ser simplificadas para realizar apenas as correções utilizando os coeficientes de Distorção Radial Simétrica k_1 e k_2 e os parâmetros de afinidade A e B . Estes parâmetros são os mais significativos para a correção da imagem obtida com câmaras digitais de pequeno formato, conforme é expresso através das Equações (4.11) e (4.12).

$$x' = x + \bar{x} \cdot (K_1 r^2 + K_2 r^4) + \bar{x}A + \bar{y}B \quad (4.11)$$

$$y' = y + \bar{y} \cdot (K_1 r^2 + K_2 r^4) + \bar{y}B \quad (4.12)$$

onde:

x, y – Coordenadas dos pontos com distorções no sistema referencial

fotogramétrico projetado na imagem;

$$\bar{x} = (x - x_0);$$

$$\bar{y} = (y - y_0);$$

x_0, y_0 – Coordenadas do Ponto Principal;

A, B – Parâmetros de afinidade.

Câmaras digitais de pequeno formato apresentam principalmente a Distorção Radial Simétrica causada pelo sistema de lentes, sendo os coeficientes k_1 e k_2 os mais significativos. Os parâmetros de afinidade entre os eixos da imagem A e B também podem ser considerados para a correção das imagens obtidas, dependendo da precisão com que o sensor da câmara foi construído pelo fabricante.

Alguns *softwares* calculam os POI de forma rápida com solução aproximada e, dependendo da aplicação a que se destina a imagem, podem ser utilizados sem maiores restrições. Um deles é o *Toolbox CALIB* para Matlab, utiliza o algoritmo proposto por Zhang (2000). Este método consiste em determinar os POI da câmara tomando diferentes imagens de um gabarito, com quadrados pretos e brancos similar a um tabuleiro de xadrez, fixado em uma superfície rígida e com padrão planar. Devem ser obtidas imagens do gabarito variando a posição e orientação da câmara, não sendo necessário conhecer a trajetória do seu movimento para a determinação dos POI. Este algoritmo possibilita o cálculo dos POI da câmara de forma aproximada através de sucessivas iterações. Para sua utilização é necessário conhecer a dimensão dos quadrados do gabarito e indicar os pontos, posições dos vértices, que serão utilizados como pontos de referência.

No algoritmo proposto por Zhang um vetor de pontos 2D é denotado por $m = [u, v]^T$ e um vetor de pontos 3D por $M = [X, Y, Z]^T$. De forma similar, pode-se aumentar estes vetores adicionando uma linha com valor igual a 1, sendo os vetores aumentados $\tilde{m} = [u, v, 1]^T$ e $\tilde{M} = [X, Y, Z, 1]^T$. A colinearidade entre o ponto no espaço objeto, centro perspectivo e o ponto no espaço imagem é utilizada para

estabelecer a relação entre os pontos 3D contidos no vetor M e os pontos na imagem 2D contidos no vetor m , conforme a Equação (4.13).

$$s\tilde{m} = A[R \ t]\tilde{M} \quad (4.13)$$

onde:

s – Fator de escala;

R, t – Parâmetros de Orientação Exterior (POE) compostos por elementos de rotação e translação, que relacionam as coordenadas obtidas no sistema 3D do espaço objeto com o sistema de coordenadas 2D da imagem;

A – É a matriz com os POI da câmara. Apresenta as coordenadas u_0 e v_0 do PP, E_α e E_β são os fatores de escala na imagem com eixos u e v . O parâmetro γ descreve a falta de ortogonalidade entre os eixos do sistema referencial da imagem.

A matriz A é expressa através da Equação (4.14).

$$A = \begin{bmatrix} E_\alpha & \gamma & u_0 \\ 0 & E_\beta & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.14)$$

Comparando as Equações (4.11) e (4.12) com o modelo proposto por Zhang expresso através da Equação (4.13), têm-se as seguintes correspondências:

- A e B são os parâmetros de afinidade das Equações (4.11) e (4.12) que correspondem aos fatores de escala E_α e E_β da Equação (4.13). Sendo que o parâmetro γ , ângulo entre os eixos da imagem, pode ser calculado a partir destes fatores de escala.
- x_0 e y_0 são as coordenadas do Ponto Principal expressas com as Equações (4.11) e (4.12) que tem suas correspondências nas coordenadas u_0 e v_0 da Equação (4.13).

O cálculo dos POI pode ser então ser realizado através da Equação (4.15)

$$\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \|m_{ij} - \hat{m}(A, R_i, t_i, M_j)\|^2 \quad (4.15)$$

onde:

$\hat{m}(A, R_i, t_i, M_j)$ – É a projeção do vetor do ponto M_j sobre a imagem i ;

R_i – É o vetor de rotação com parâmetros r .

O algoritmo proposto por Zhang (2000) utiliza somente os dois primeiros termos de Distorção Radial Simétrica para a correção da imagem através dos coeficientes k_1 e k_2 , conforme Equações (4.16) e (4.17). Câmaras digitais de pequeno formato normalmente apresentam distorções de lentes significantes, especialmente a Distorção Radial Simétrica. A função de distorção é fortemente influenciada pelos componentes radiais, principalmente o primeiro termo k_1 . Dadas as coordenadas de uma imagem (u, v) consideradas livres de distorção, e as correspondentes coordenadas de imagem observadas (\tilde{u}, \tilde{v}) , consegue-se projetar os pontos através da relação de colinearidade entre eles. De forma similar (x, y) são as coordenadas de imagem consideradas livres de distorção e (\tilde{x}, \tilde{y}) as coordenadas que possuem distorção. Estas coordenadas têm suas escalas compatibilizadas através de uma normalização.

$$\tilde{x} = x + x[k_1(x^2 + y^2) + k_2(x^2 + y^2)^2] \quad (4.16)$$

$$\tilde{y} = y + y[k_1(x^2 + y^2) + k_2(x^2 + y^2)^2] \quad (4.17)$$

onde:

k_1, k_2 – São os coeficientes de Distorção Radial Simétrica. O centro desta distorção encontra-se no Ponto Principal projetado na imagem.

Com $\tilde{u} = u_0 + a\tilde{x} + \gamma\tilde{y}$ e $\tilde{v} = v_0 + \beta\tilde{y}$ e assumindo $\gamma = 0$ em uma imagem que tem os eixos perpendiculares, tem-se a relação expressa com as Equações (4.18) e (4.19).

$$\tilde{u} = u + (u - u_0)[k_1(x^2 + y^2) + k_2(x^2 + y^2)^2] \quad (4.18)$$

$$\tilde{v} = v + (v - v_0)[k_1(x^2 + y^2) + k_2(x^2 + y^2)^2] \quad (4.19)$$

Uma opção para estimar os coeficientes k_1 e k_2 é feita através de sucessivas iterações utilizando as coordenadas u e v dos píxeis considerados

isentos de erro. Com isto, têm-se duas expressões para os pontos da imagem conforme a Equação (4.20).

$$\begin{bmatrix} (u - u_0)(x^2 + y^2) & (u - u_0)(x^2 + y^2)^2 \\ (v - v_0)(x^2 + y^2) & (v - v_0)(x^2 + y^2)^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} k_1 \\ k_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \tilde{u} - u \\ \tilde{v} - v \end{bmatrix} \quad (4.20)$$

Dados m pontos em n imagens podemos obter $2 \cdot m \cdot n$ equações. Na forma matricial: $Dk = d$, onde $k = [k_1 \ k_2]^T$. A solução deste sistema de equações é possível pelo método dos mínimos quadrados, conforme a Equação (4.21).

$$k = (D^T D)^{-1} D^T d \quad (4.21)$$

Uma vez que k_1 e k_2 foram calculados, pode-se refinar a estimação dos outros parâmetros resolvendo novamente a Equação (4.15), substituindo os valores de $\hat{m}(A, R_i, t_i, M_i)$ pelos valores calculados com as Equações (4.18) e (4.19).

A estimação do conjunto completo de POI pode ser expressa através da Equação (4.22).

$$\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \|m_{ij} - \tilde{m}(A, k_1, k_2, R_i, t_i, M_j)\|^2 \quad (4.22)$$

onde:

$\tilde{m}(A, k_1, k_2, R_i, t_i, M_j)$ - É função da projeção do vetor do ponto M_j na imagem i de acordo com a Equação (4.13).

Com este método, no mínimo duas imagens devem ser adquiridas com orientações diferentes se os elementos sensores da câmara forem quadrados. Zhang (2000) recomenda a aquisição de pelo menos cinco imagens para obter melhores resultados com o processo de calibração. Sendo assim, os passos para realizar a calibração da câmara utilizando este método são:

1. Imprimir o gabarito e fixá-lo em uma superfície plana e rígida;
2. Tomar imagens do gabarito com diferentes orientações, variando a posição e orientação da câmara;

3. Realizar a leitura das coordenadas dos pontos de controle nas imagens;
4. Estimar os POI e POE utilizando solução aproximada;
5. Refinar todos os parâmetros, incluindo os parâmetros de distorção de lentes através da Equação (4.22).

Os passos 4 e 5 são realizados automaticamente pelo *Toolbox* CALIB do *software* Matlab, devendo o usuário apenas inserir as imagens no *software* e realizar as leituras dos vértices dos quadrados nas imagens do gabarito.

4.2 ANÁLISE DA PRESENÇA DE RUÍDO

Os píxeis saturados, causados por exposição prolongada do sensor na aquisição da imagem, e também os píxeis com baixa exposição, devem ser cuidadosamente analisados na imagem, pois também podem causar erros nas medidas de distância devido à presença de ruído. Quando o sensor capta o sinal luminoso, existe um limite máximo de saturação que não pode ser diminuído posteriormente.

Khongsab (2009) utilizou como parâmetro principal o tempo de integração na captação da imagem para controlar a saturação dos píxeis. Como este tempo é aplicado globalmente ao sensor, acaba influenciando os valores digitais dos píxeis da imagem de forma equivalente. Alguns apresentam erros devido à baixa exposição, pois com a redução do tempo de integração não receberam energia eletromagnética suficiente para sensibilizar o sensor, sendo chamados de píxeis insaturados. Estes problemas podem ser minimizados definindo-se tempos de integração adequados para a obtenção da imagem TOF.

O tratamento do ruído pode ser realizado com diferentes filtragens na imagem. Com este objetivo foram estudados os filtros passa-baixas pela média e mediana. Outro processo de filtragem realizado foi o cálculo da média dos valores de distância para diferentes imagens de uma mesma cena, com o mesmo tempo de integração, mas adquiridas em instantes brevemente diferentes.

4.2.1 Filtragem passa-baixas pela média

O cálculo da média dos valores da vizinhança em torno do pixel de interesse tem o efeito de suavizar a imagem. Este processo, conhecido como filtro linear passa-baixas atenua as altas frequências, que no espaço de frequências correspondem às transições rápidas. Este tipo de variação caracteriza também a presença de ruído na imagem. A suavização tende a minimizar a presença de ruído e têm o efeito de tornar a imagem menos contrastante. O filtro linear passa-baixas utilizado tem dimensão 3x3, com pesos iguais para os vizinhos. Filtros lineares resultam da convolução de uma janela móvel sobre a imagem. A Equação (4.23) representa o modelo matemático aplicado na filtragem linear passa-baixas pela média (CENTENO, 2004).

$$G(y, x) = \sum_{i=1}^T \sum_{j=1}^T (p(i, j) \cdot I(y + i - a, x + j - a)) \quad (4.23)$$

onde:

$I(y, x)$ – Corresponde ao valor do pixel na posição “linha = y ” e “coluna = x ”;

$p(i, j)$ – Representa o filtro;

T – Tamanho da janela de filtragem;

$G(y, x)$ – Imagem resultante da filtragem;

$$a = \text{int} \left(\frac{T}{2} \right) + 1.$$

A Figura 4.2 ilustra o filtro linear passa-baixas pela média, a janela central cinza, que está na matriz de uma imagem. Este filtro tem dimensão de 3x3 píxeis e atua no valor digital 48 do pixel central. O valor digital do pixel após a filtragem passa a ser 41,222, que corresponde a média dos valores digitais dos píxeis vizinhos.

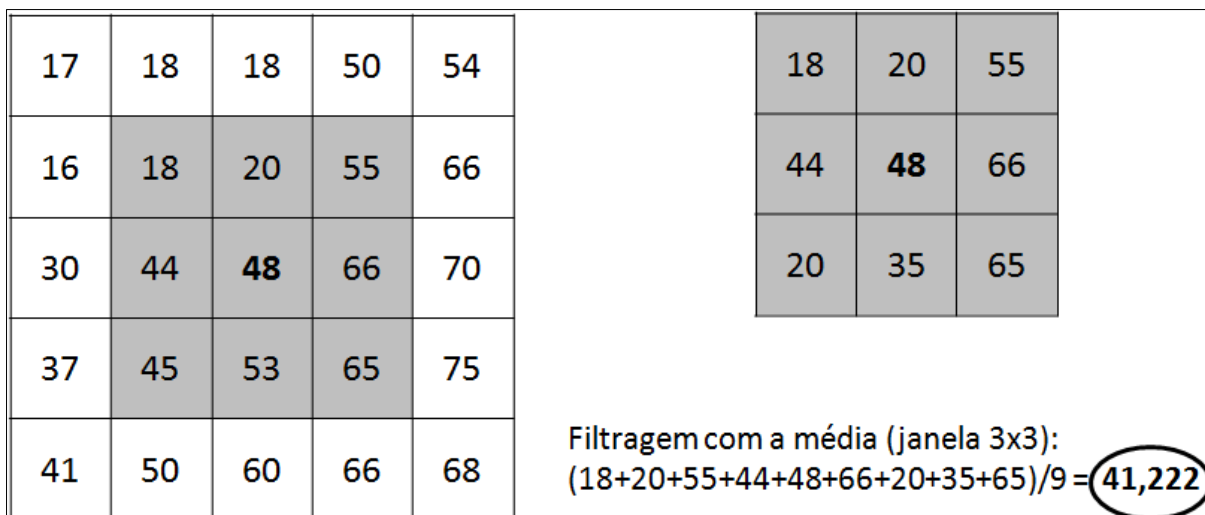


FIGURA 4.2 – Filtragem passa-baixas pela média

4.2.2 Filtragem pela mediana

A filtragem não linear pela mediana consiste na substituição do valor do pixel central, pelo valor correspondente a mediana da vizinhança. Este método também suaviza a presença de ruído. A diferença principal em relação ao filtro da média é que o filtro da mediana não introduz novos valores na imagem, pois substitui o valor central da vizinhança por um valor já existente na imagem. Sendo assim, não degrada as bordas dos objetos de forma extrema. A Figura 4.3 ilustra esta filtragem, que resultará no valor digital 44 para o pixel filtrado que anteriormente apresentava valor digital 48.

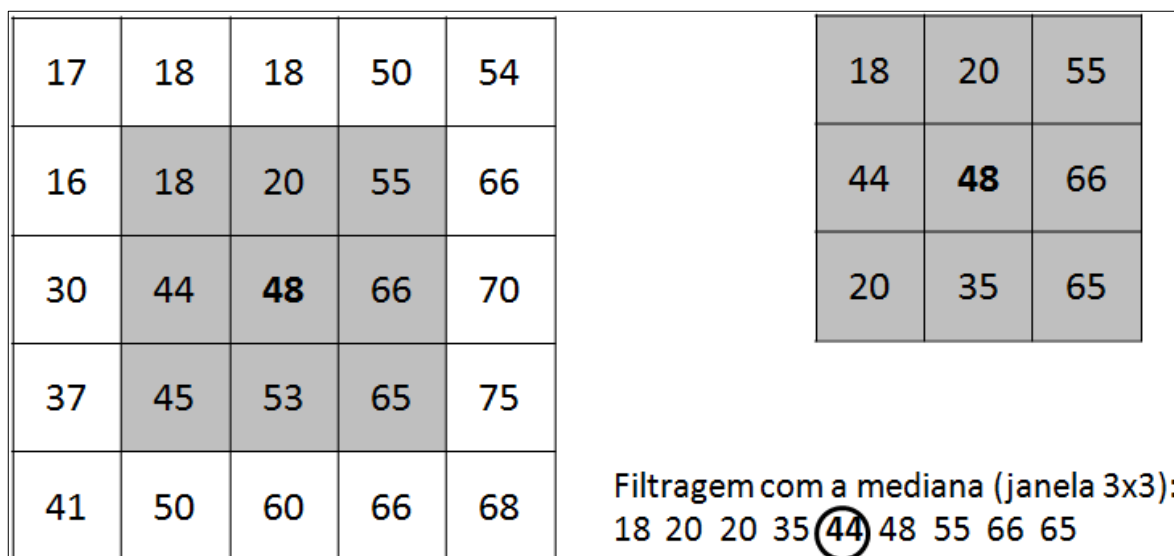


FIGURA 4.3 – Filtragem pela mediana

4.2.3 Filtragem com a média temporal

A terceira opção é a ponderação dos valores dos píxeis ao longo do tempo. Para isto, uma série de imagens foi obtida a partir do mesmo ponto de vista em instantes diferentes. O resultado foi um conjunto de imagens de um único objeto desde a mesma perspectiva, não sendo a geometria da imagem alterada. Assim, cada pixel de uma imagem tem seu equivalente nas outras. Assumindo que o ruído seja aleatório, é esperado que o uso de mais de uma imagem diminua a presença de ruído através do cálculo da média dos valores observados.

A filtragem com a média temporal é ilustrada com a Figura 4.4. Nesta figura tem-se a representação de três imagens com suas matrizes de valores digitais ($I_{i=1,2,3}$) e a imagem filtrada (I_F) resultante, que corresponde a média das três imagens originais.

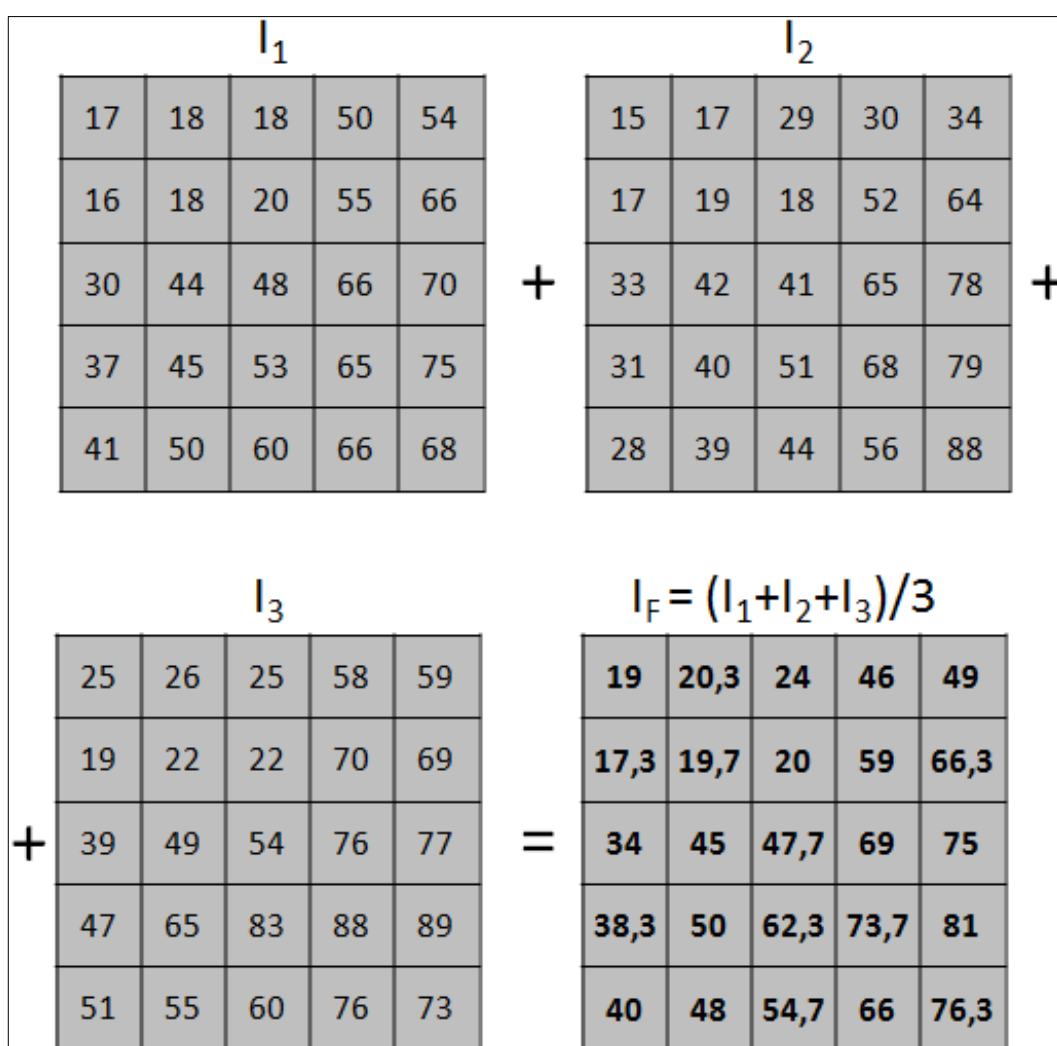


FIGURA 4.4 – Filtragem utilizando a média temporal

4.3 SEGMENTAÇÃO

Com a etapa de segmentação objetivou-se separar o conjunto de dados em subconjuntos. Estes subconjuntos são compostos por pontos com coordenadas tridimensionais que descrevem as superfícies de objetos. É assumido que estas superfícies são partes estruturais do objeto a ser identificado. Para atingir esta meta, duas alternativas foram desenvolvidas e avaliadas:

1) Crescimento de regiões a partir de superfícies planas e ponto semente: utilizando o arquivo de intensidades da imagem TOF para selecionar a posição de pontos ou regiões semente, sendo o arquivo de distâncias utilizado para o crescimento de regiões;

2) Segmentação por análise da variação local de autovalores: utilizando somente o arquivo de distâncias da imagem TOF para gerar uma imagem de intensidade com bordas intensificadas, que posteriormente é segmentada em regiões que têm seus píxeis projetados gerando uma nuvem de pontos 3D destas superfícies segmentadas. A segmentação da imagem de intensidade com bordas evidenciadas gerada é realizada utilizando o algoritmo de deslocamento pela média.

4.3.1 Crescimento de regiões a partir de superfícies planas e ponto semente

O primeiro método proposto se baseia no crescimento de regiões por agregação de elementos adjacentes. Este método utiliza um critério de similaridade para avaliar se um ponto pertence a uma determinada região. A distância de um ponto a uma superfície plana e o valor digital de um pixel em uma imagem são exemplos de critérios de similaridade que podem ser utilizados (GONZALEZ e WOODS, 2000).

Partindo de um subconjunto de pontos adjacentes que pertencem a uma superfície plana, o processo consiste em buscar na vizinhança outros pontos que estejam espacialmente próximos a esta superfície atendendo ao critério de coplanaridade. Neste critério a distância ortogonal do ponto a uma superfície plana é calculada através das coordenadas 3D do ponto, sendo este ponto considerado pertencente à superfície quando está dentro do limiar estabelecido. A superfície plana é determinada através do autovetor com menor autovalor do conjunto de

pontos 3D, a distância ortogonal é calculada na direção deste autovetor, partindo da superfície. O processo é iterativo, de forma que o subconjunto inicial cresce agregando novos elementos em cada iteração, até atingir os limites da superfície, quando o critério de coplanaridade não é mais satisfeito.

O primeiro problema consiste na identificação de pontos ou regiões semente para dar início ao processo de crescimento. Uma opção foi identificar visualmente regiões planas no arquivo de intensidades da imagem TOF e realizar a leitura de coordenadas de pontos nestas regiões. A partir das coordenadas destes pontos selecionados na imagem de intensidade e de suas correspondentes no arquivo de distâncias da imagem TOF, determinou-se a superfície plana que mais se aproxima a esta região através do cálculo de seus autovetores e autovalores, esta foi considerada a superfície semente.

A hipótese básica assume que superfícies planas, ou pelo menos partes delas, aparecem como regiões uniformes na imagem de intensidade, devido às condições de iluminação. Esta hipótese nem sempre pode ser verificada e confirmada. Por exemplo, se a superfície é coberta por tonalidades com padrão irregular de cor, então o plano pode mostrar valores não uniformes na imagem de intensidade, sendo este um caso extremo. Em uma situação real, pode ocorrer que parte da superfície plana esteja pintada ou contenha manchas que alterem a sua resposta espectral. O mesmo pode ocorrer se houverem sombras projetadas de outros objetos sobre a superfície. Neste caso, porém, existem outras regiões da superfície plana que podem aparecer uniformes na imagem de intensidade e serem utilizadas como região semente.

Com base nesta suposição, buscaram-se regiões uniformes na imagem de intensidade e verificou-se a possibilidade de formarem superfícies planas que pudessem ser utilizadas como sementes no arquivo de distâncias da imagem TOF. A solução proposta consiste em segmentar a imagem de intensidade em regiões uniformes com atributos de cor. Um limite mínimo no tamanho das regiões deve ser fixado para evitar que regiões muito pequenas sejam incluídas na análise, visto que estas regiões pequenas podem representar locais com curvatura.

A chave para o crescimento de regiões é a definição do grau de pertinência de cada ponto à superfície plana. Para isto, é utilizado o conceito de distância mínima do ponto a esta superfície. Para pertencer a uma região, os pontos devem

estar dentro do limite de proximidade, ou seja, a distância entre o ponto e a superfície plana não pode superar o limiar fixado.

A qualidade deste processo depende de fatores como o estabelecimento de correspondência entre os pontos, precisão na determinação da superfície normal utilizada, remoção de erros grosseiros do conjunto de observações e identificação da região semente.

4.3.2 Segmentação por análise da variação local de autovalores

Esta abordagem baseia-se na análise da variação local dos autovalores e autovetores. A hipótese básica nesta metodologia foi considerar que ao longo de uma superfície plana os autovalores devem apresentar valores similares ou muito próximos. Considerando duas regiões adjacentes, se estas regiões forem coplanares, então a magnitude relativa de seus autovalores será aproximadamente igual. Se uma destas regiões encontra-se em uma borda do objeto, os autovetores serão diferentes. A região a ser considerada é uma janela quadrada em torno do pixel central. Para efetuar esta análise, devem ser calculados os autovalores de uma região em torno de cada pixel no arquivo de distâncias da imagem TOF. Estes autovalores são armazenados em matrizes que geram três novas imagens digitais com as bordas dos objetos intensificadas.

Com a Figura 4.5 ilustra-se a análise do arquivo de distâncias da imagem TOF realizado com o cálculo de seus autovalores. As bordas dos objetos presentes podem ser vistas em evidência, são representadas com os maiores valores.

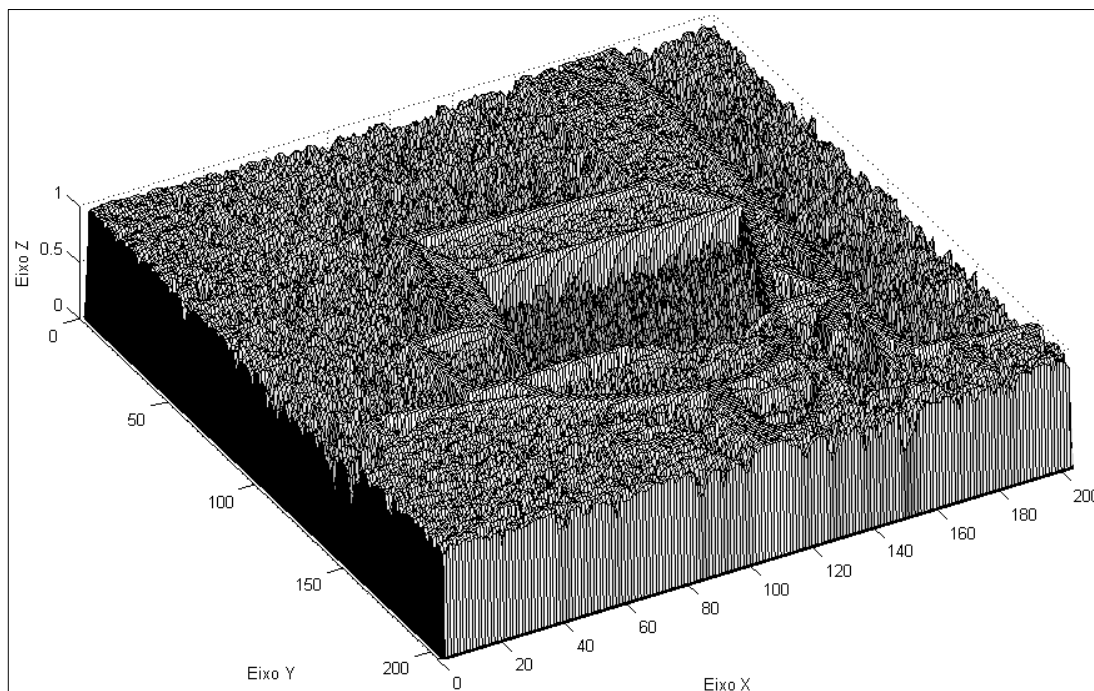


FIGURA 4.5 – Intensificação de bordas com autovalores

Os autovalores calculados para cada pixel são normalizados na faixa de 0 a 255, utilizando-se 8 bits. Assim, estes valores podem ser representados como uma imagem digital passível de ser analisada com *softwares* de processamento. A Figura 4.6 ilustra uma imagem com bordas intensificadas proveniente da segmentação realizada com a análise da variação local dos autovalores.

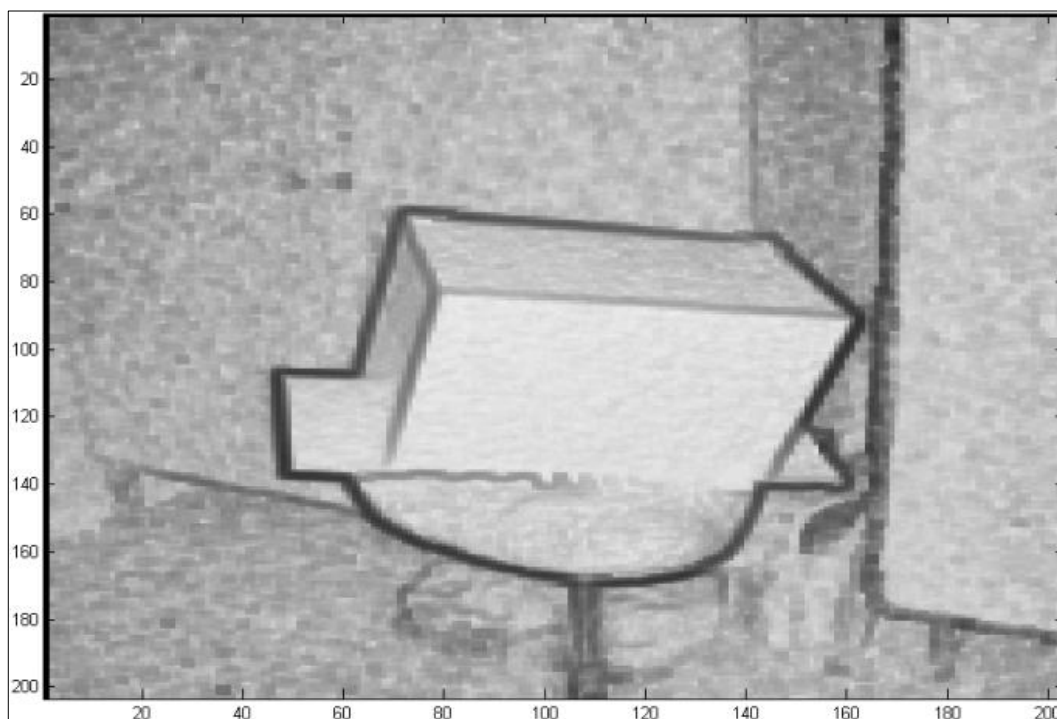


FIGURA 4.6 – Imagem com bordas intensificadas

A imagem produzida pode então ser segmentada utilizando o algoritmo de deslocamento pela média. Os resultados da segmentação são regiões onde os autovalores são aproximadamente iguais, definindo uma superfície com padrão planar, sendo estas superfícies separadas das regiões de bordas.

4.3.3 Segmentação com o algoritmo de deslocamento pela média

A segmentação com o algoritmo de deslocamento pela média é realizada utilizando a imagem com as bordas dos objetos intensificadas, gerada com a segmentação do arquivo de distâncias da imagem TOF pela análise da variação local dos autovalores.

Cada um dos três autovalores calculados gera uma imagem com bordas intensificadas. Sendo assim, espera-se que os valores digitais dos píxeis nas superfícies dos objetos sejam similares dentro desta imagem. Com isto a segmentação proporcionará a seleção das superfícies do objeto.

Para realizar a segmentação da imagem de intensidade com as bordas intensificadas deve-se escolher os parâmetros (h_s, h_r, H) mais adequados para a segmentação. Estes parâmetros correspondem ao domínio espacial da imagem h_s , domínio de características dos píxeis h_r e o tamanho mínimo H que as áreas segmentadas devem possuir. O limite mínimo na quantidade de píxeis deve ser fixado para evitar que regiões muito pequenas sejam incluídas na segmentação, o que pode prejudicar esta etapa, pois se espera que a imagem seja segmentada com o menor número de regiões.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 CALIBRAÇÃO DA CÂMARA

Com o objetivo de calcular os POI o processo de calibração da câmara foi realizado com o *Toolbox CALIB* do *software* Matlab que utiliza o método proposto por ZHANG (2000). O gabarito fotografado foi impresso com 7x9 quadrados com dimensão de 117x117mm. Estas imagens foram captadas a uma distância aproximada de 2,5 metros da câmara. Para que houvesse pontos do gabarito sobre a área da imagem foram obtidas 36 imagens com diferentes orientações, conforme é ilustrado com a Figura 5.1.

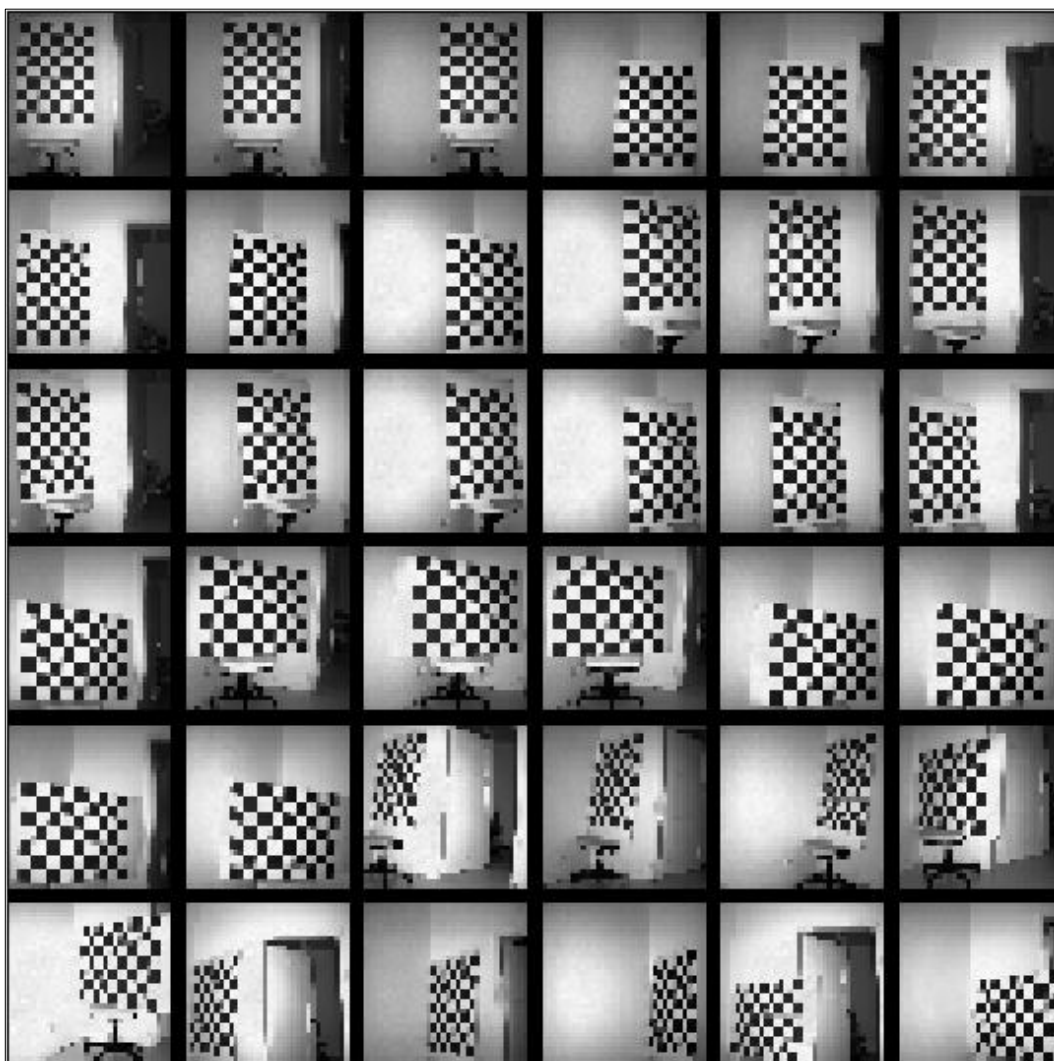


FIGURA 5.1 – Imagens do gabarito utilizadas na calibração da câmara

A Orientação Exterior das imagens em relação à câmara para a calibração é ilustrada com a Figura 5.2. A câmara é representada com a pirâmide em linhas vermelhas e a origem do sistema fotogramétrico é representada com a interseção das linhas representadas com a cor azul, no vértice da pirâmide.

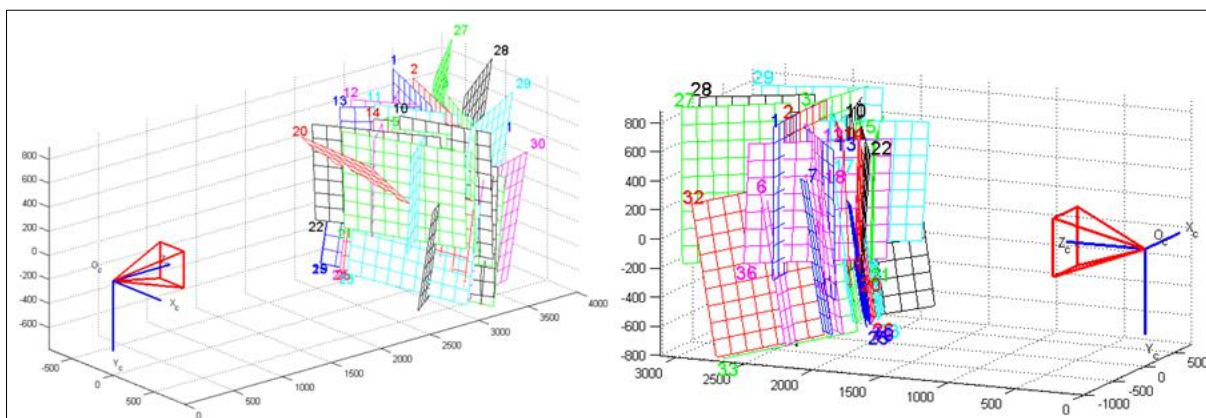


FIGURA 5.2 – Orientação Exterior das fotografias para a calibração da câmara

A distorção causada pelo sistema de lentes da câmara ocorre de forma mais intensa nas bordas da imagem, sendo a região central o local com menor presença desta distorção. A Figura 5.3 comprova este fato, onde os vetores representados com a cor vermelha partem dos pontos de controle na imagem e indicam a direção e o sentido em que a distorção aumenta.

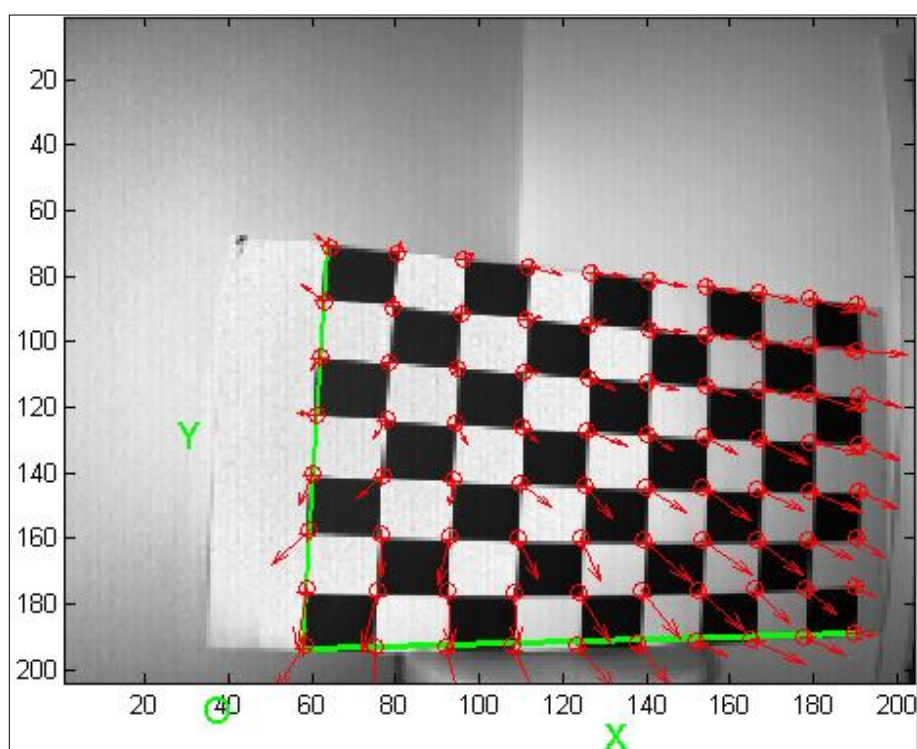


FIGURA 5.3 – Direção das distorções nos pontos da imagem TOF

Realizada a leitura das coordenadas dos pontos de controle, os POI foram calculados com o processo de calibração da câmara e são apresentados com a Tabela 5.1.

PARÂMETROS INICIAIS OBTIDOS COM A LEITURA DAS IMAGENS				
PARÂMETRO	VALOR			
	(píxeis)		(mm)	
Distância focal (f): (f_x) (f_y)	285, 80288		12,86113	
	285, 80288		12,86113	
Coordenadas do Ponto Principal: (x_0) (Origem no canto superior esquerdo) (y_0)	101,50000		4,56750	
	101,50000		4,56750	
PARÂMETROS DETERMINADOS COM A CALIBRAÇÃO DA CÂMARA				
PARÂMETRO	VALOR		DESVIO (3σ)	
	(píxeis)	(mm)	(píxeis)	(mm)
Distância focal (f_c) calibrada: (f_{xc}) (f_{yc})	292,40511	13,15823	$\pm 3,73164$	$\pm 0,167924$
	293,64057	13,21383	$\pm 3,35357$	$\pm 0,150911$
Coordenadas do Ponto Principal: (x_{0c}) (Origem no canto superior esquerdo) (y_{0c})	104,35253	4,695864	$\pm 3,20459$	$\pm 0,144207$
	100,22287	4,510029	$\pm 3,36886$	$\pm 0,151599$
K_1	-0,46768	-0,021045	$\pm 0,03106$	$\pm 0,001398$
K_2	0,60997	0,027449	$\pm 0,13880$	$\pm 0,006246$
K_3	0,00107	$4,8150e^{-5}$	$\pm 0,00162$	$\pm 7,2900e^{-5}$
P_1	0,00035	$1,9350e^{-5}$	$\pm 0,00204$	$\pm 9,1800e^{-5}$
P_2	0,00000	0,000000	$\pm 0,00000$	$\pm 0,000000$
Erro em pixel: (E_x) (E_y)	0,49340	0,022203		
	0,42754	0,019239		

TABELA 5.1 – Parâmetros de Orientação Interior calculados

Com os valores dos POI determinados foram calculados os fatores de escala dos píxeis nas direções s_x e s_y , conforme as Equações (5.1) e (5.2).

$$s_x = \frac{f}{f_{xc}} = \frac{12,8mm}{13,15823mm} = 0,972775 \quad (5.1)$$

$$s_y = \frac{f}{f_{yc}} = \frac{12,8mm}{13,21383mm} = 0,968682 \quad (5.2)$$

A partir dos fatores de escala e da dimensão do pixel igual a $45\mu m$ das imagens obtidas com a câmara PMD CamCube 2.0, foi calculado o tamanho efetivo dos píxeis nas direções x e y através das Equações (5.3) e (5.4).

$$P_x = P \cdot s_x = 45\mu m \cdot 0,972775 = 43,774875\mu m \cong 44\mu m \quad (5.3)$$

$$P_y = P \cdot s_y = 45\mu m \cdot 0,968682 = 43,590690\mu m \cong 44\mu m \quad (5.4)$$

Os valores obtidos com as Equações (5.3) e (5.4) indicam que os elementos do sensor podem ser considerados quadrados. De acordo com Bazan *et al.* (2009) quando a diferença de escala entre os lados do píxel não é fornecida pelo fabricante da câmara o fator de escala calculado para x pode absorver esta diferença.

Com a razão entre as distâncias focais obtidas com a calibração da câmara pode-se verificar a diferença de escala. Para a dimensão do sensor esta diferença de escala não alcança o tamanho de um píxel, conforme Equação (5.6).

$$DIF_{ESC} = \frac{f_{xc}}{f_{yc}} = \frac{13,21383 \text{ mm}}{13,15823 \text{ mm}} - 1 = 1,004225 - 1 = 0,004225 \quad (5.5)$$

$$DIF_{ESC} = 0,004225 * 204 = 0,8619 < 1 \text{ pixel} \quad (5.6)$$

A Equação (5.6) indica que a diferença de escala entre os eixos x e y é menor que a dimensão de um píxel, isto considerando toda a dimensão da imagem de 204x204 píxeis da câmara PMD CamCube 2.0.

Determinados os POI a imagem pode então ter sua geometria corrigida conforme é ilustrado com a Figura 5.4b. A Figura 5.4a ilustra a imagem original obtida do gabarito, onde se apresentam curvaturas provenientes da distorção causada pelo sistema de lentes da câmara.

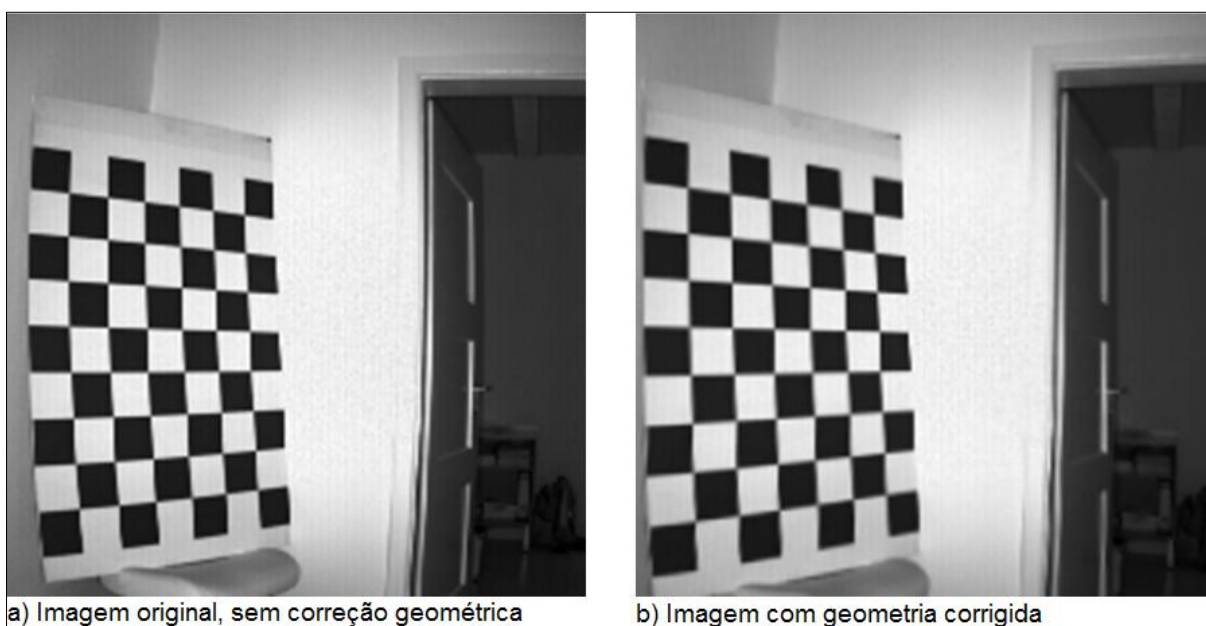


FIGURA 5.4 – Correção geométrica da imagem TOF

Para a correção geométrica de imagens obtidas com câmaras de pequeno formato Zhang (2000) recomenda utilizar somente os parâmetros de distância focal calibrada f_c , coordenadas do Ponto Principal no plano da imagem x_0 e y_0 , e os coeficientes de Distorção Radial Simétrica até o segundo termo K_1 e K_2 . Isto porque este modelo de câmara apresenta principalmente a Distorção Radial Simétrica. Outro fator diz respeito ao desvio calculado na determinação de cada um destes parâmetros, conforme valores apresentados na Tabela 5.1, o terceiro parâmetro de Distorção Radial Simétrica K_3 e os parâmetros de Distorção Descentrada P_1 e P_2 apresentaram valores de desvios maiores do que os próprios parâmetros, devendo então serem desconsiderados para a correção geométrica da imagem.

5.2 EXPERIMENTO 1 – ANÁLISE DE RUÍDO 1: IMAGEM TOF INTEIRA

O objetivo deste experimento consistiu em avaliar a presença de ruído em função do tempo de integração (TI) na aquisição das imagens TOF. Para sua realização foram utilizadas imagens de uma parede com superfície plana distante 1,30m da câmara PMD CamCube 2.0, onde também aparece parte de uma porta. Foram tomadas cinco imagens para cada valor de TI, que variou entre 500, 1000, 1500, 1700, 1800, 1900, 2000, 2500, 3000, 3500, 4000, 4500, 5000, 5300, 5500, 6000 e 7000 μ s, gerando assim um conjunto de 85 imagens TOF.

Com o objetivo de avaliar e reduzir a presença de ruído nas imagens foram realizadas as seguintes filtrações:

- Filtro passa-baixas pela média;
- Filtro pela mediana;
- Cálculo da média dos valores de distância para imagens TOF adquiridas com mesmo TI em instantes brevemente diferentes.

Para cada imagem original, foram criadas três novas imagens filtradas com os procedimentos mencionados.

No gráfico de dispersão ilustrado com a Figura 5.5, os desvios padrão para o conjunto de observações são mostrados em função do TI. Foram calculados com referência no pixel central com coordenadas (102, 102) e a área utilizada para o cálculo possui dimensão de 10x10 píxeis. Escolheu-se esta região por apresentar padrão planar da superfície com menor distorção causada pelo sistema de lentes da câmara, tendo-se em vista que nesta etapa não foi realizada a correção geométrica dos dados da imagem TOF.

Ainda com a Figura 5.5, verificou-se que o filtro da mediana aplicado nas imagens gerou os menores desvios para a janela de 10x10 píxeis. O menor desvio calculado foi 1,2mm, encontrado utilizando o filtro da mediana para o TI igual a 3000 μ s. Verificou-se também que os desvios apresentam valores similares para os tempos de integração que variaram entre 1500 à 2500 μ s para as imagens originais e também para as imagens filtradas.

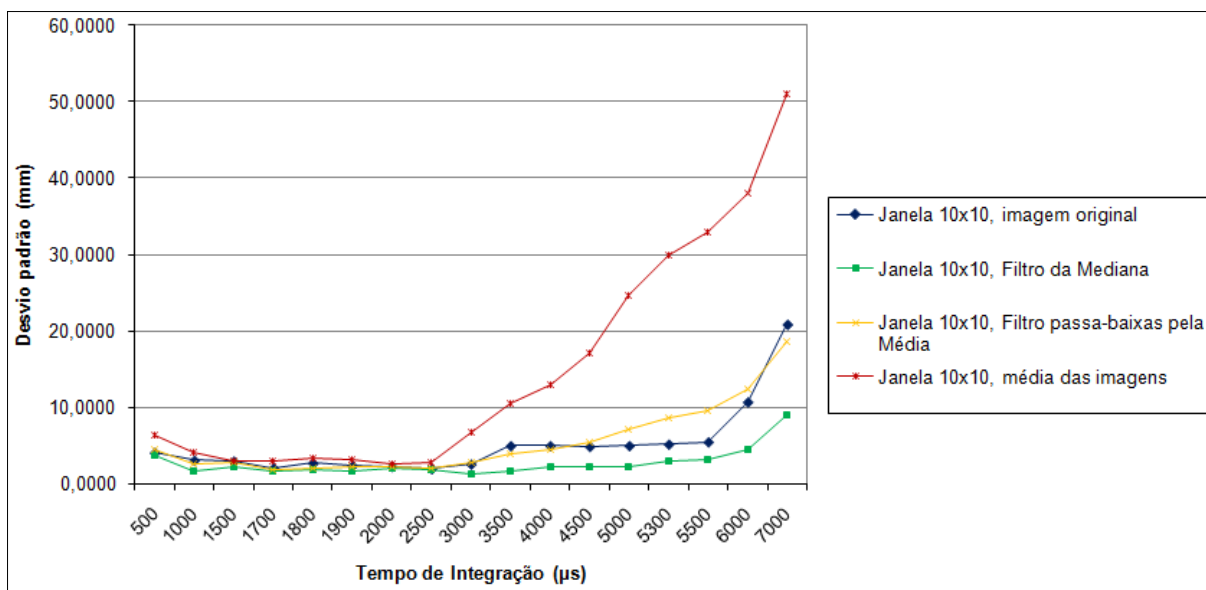


FIGURA 5.5 – Desvio padrão x TI, janelas 10x10

A partir do gráfico de dispersão da Figura 5.5 escolheram-se imagens captadas com os tempos de integração de 500, 2000 e 2500µs para realizar os testes. A Figura 5.6 ilustra superfícies geradas a partir de filtragens realizadas em imagem TOF obtida com TI igual a 500µs.

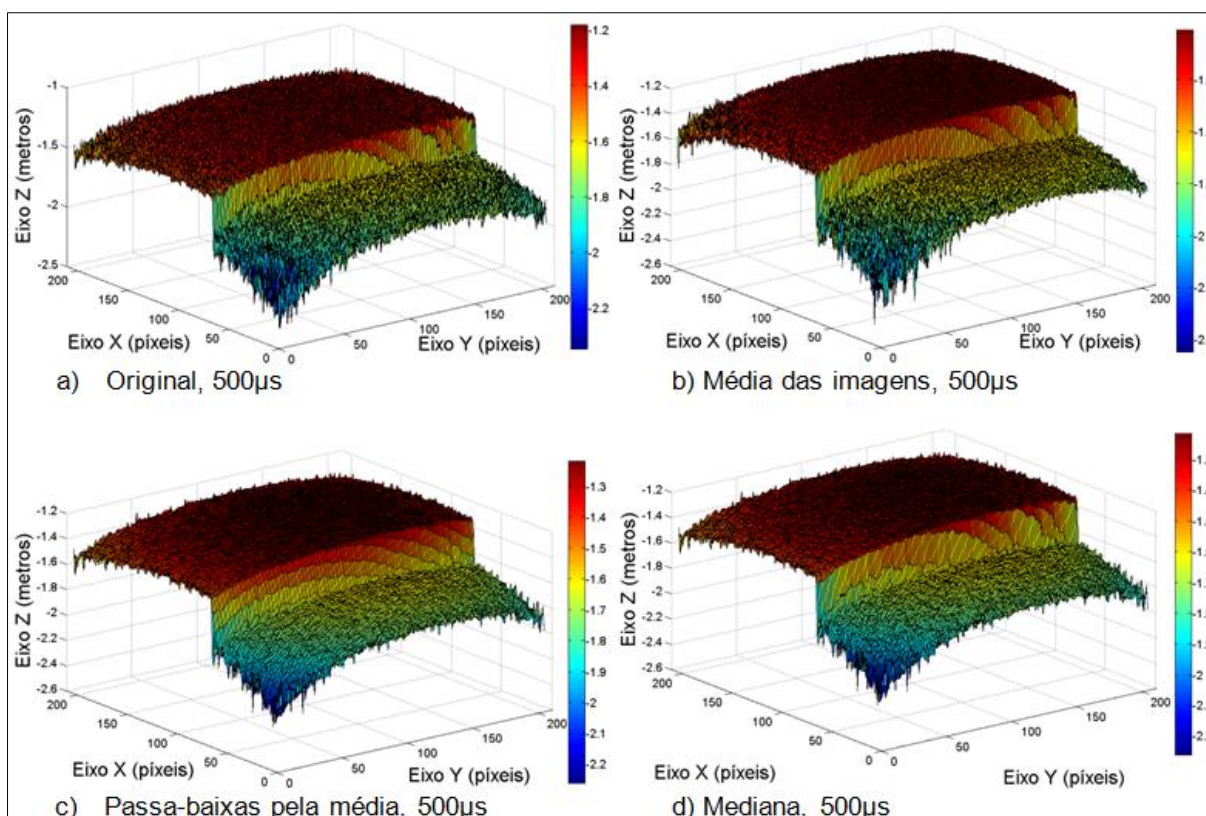


FIGURA 5.6 – Imagens para TI=500µs e d=1,30m

Com TI de $500\mu\text{s}$ verificou-se intensa presença de ruído na imagem original e também nas imagens filtradas. Isto ocorreu devido ao baixo tempo de exposição do sensor. A distorção causada pelo sistema de lentes da câmara também pode ser visualizada nestas superfícies geradas com os arquivos de distâncias da imagem TOF. As imagens foram obtidas de uma parede plana em que aparece parte de uma porta, o que justifica a descontinuidade vista em forma de degrau. A análise realizada com TI de $2000\mu\text{s}$ é ilustrada com a Figura 5.7.

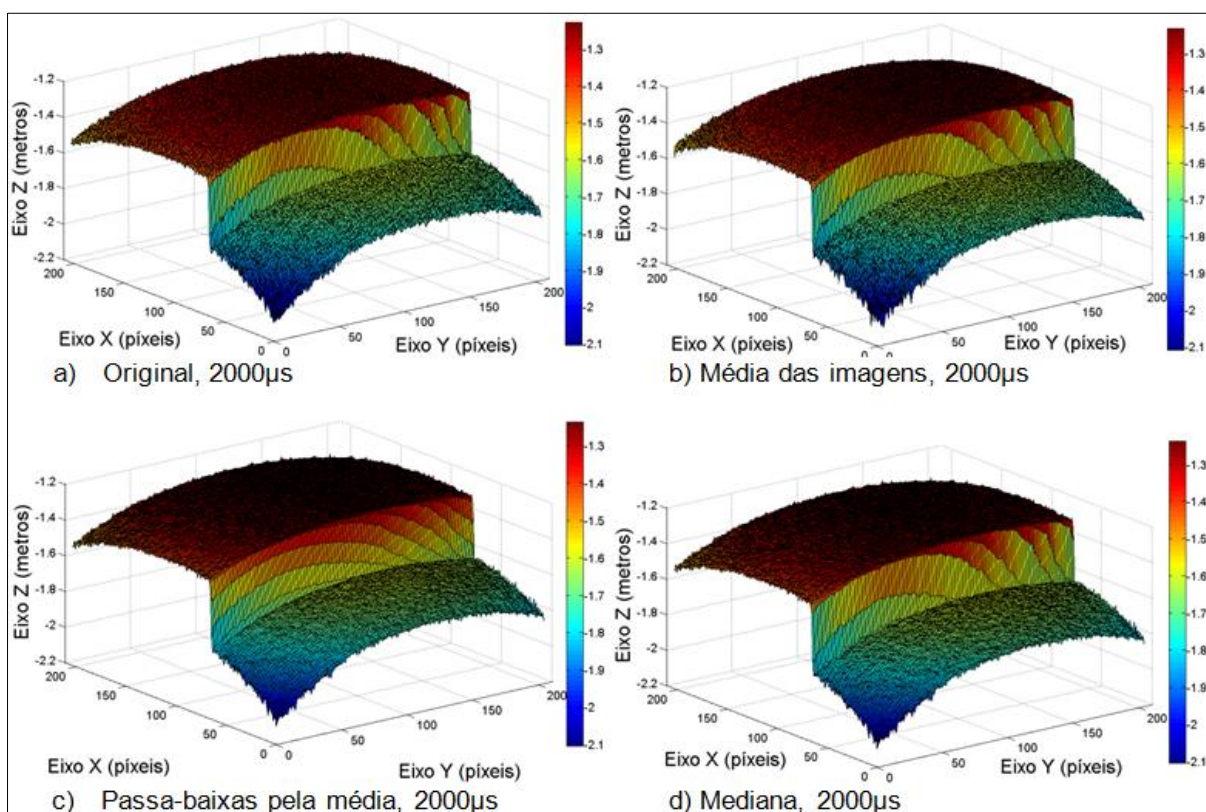


FIGURA 5.7 – Imagens para $TI=2000\mu\text{s}$ e $d=1,30\text{m}$

Com TI de $2000\mu\text{s}$ obtiveram-se resultados melhores do que os obtidos com TI de $500\mu\text{s}$, as superfícies apresentaram-se mais suaves confirmando a tendência demonstrada com o gráfico de dispersão da Figura 5.5.

A última análise deste experimento foi realizada com o tempo de integração de $2500\mu\text{s}$, conforme pode ser visualizado com as superfícies geradas com os arquivos de distâncias da imagem TOF original e das imagens filtradas ilustradas com a Figura 5.8.

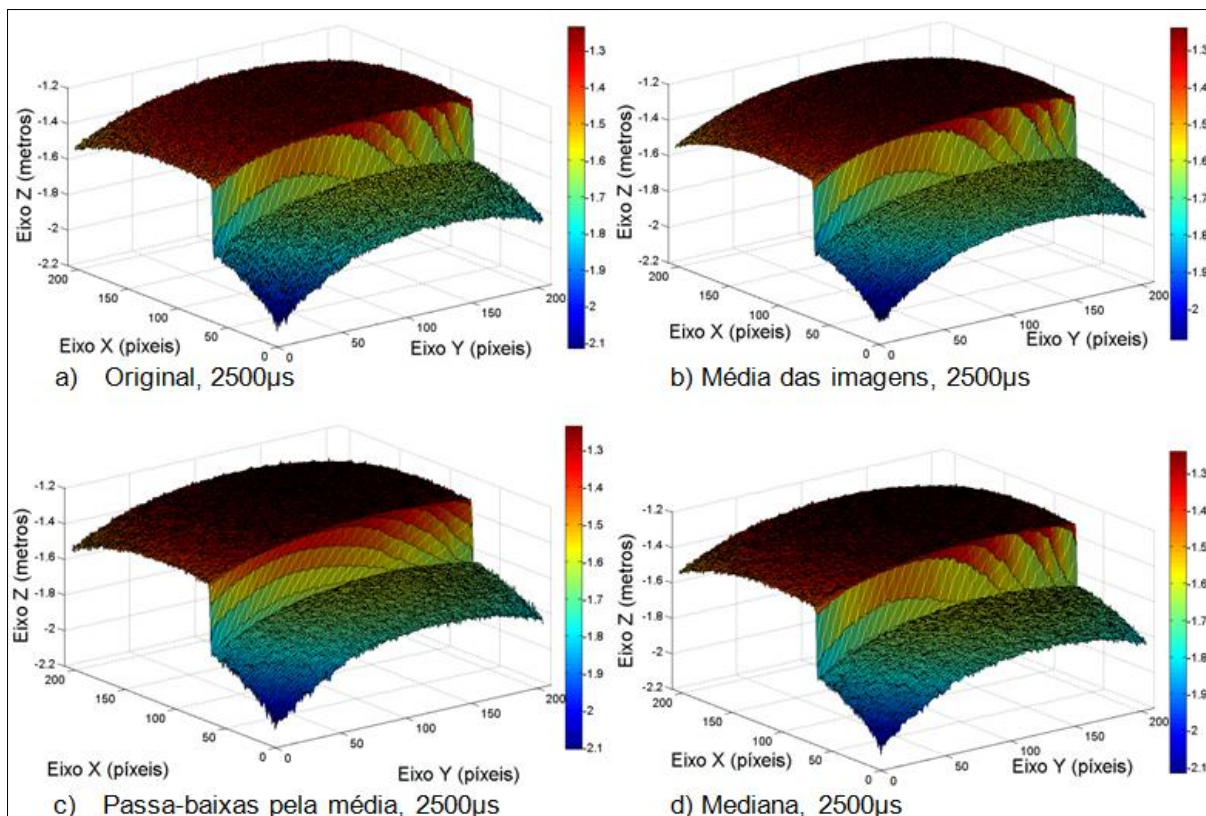


FIGURA 5.8 – Imagens para TI=2500µs e d=1,30m

As imagens filtradas com TI de 2000µs e 2500µs apresentam suavizações similares nas superfícies geradas com os arquivos de distâncias da imagem TOF. Verificou-se que o tempo de integração para a aquisição das imagens da parede a 1,3m de distância da câmara, deve ser um destes valores. O TI de 2000µs pode ser o escolhido e está de acordo com o gráfico de dispersão ilustrado com a Figura 5.5.

As filtragens de suavização com o filtro passa-baixas pela média e pela mediana mostraram-se as melhores opções a serem utilizadas, com estas filtragens apresentaram-se os menores desvios para a janela central de 10x10 píxeis. Uma vantagem da filtragem pela mediana é que mantêm os valores originais de distância para os píxeis da imagem e preserva as bordas do objeto imageado. No entanto, a filtragem com a mediana degrada as bordas da imagem, devendo ser cuidadosamente analisada para cada aplicação.

Também foram calculados os desvios padrão para as imagens inteiras e os valores obtidos foram de 19cm em média. Este grande valor deveu-se a maior curvatura ocorrer nas extremidades da imagem e também ao fato de haver uma descontinuidade na superfície presente na imagem TOF, causada pela porta presente na superfície da parede.

5.3 EXPERIMENTO 2 – ANÁLISE DE RUÍDO 2: JANELAS DE 40X40 PÍXEIS

O objetivo deste experimento foi analisar a presença de ruído em áreas centrais da imagem TOF. Para isto escolheram-se janelas com dimensões de 40x40 píxeis ao redor do pixel central da imagem. Calculou-se o desvio padrão da distância de cada pixel em relação a este pixel central. As janelas utilizadas tiveram sua posição na imagem variando de (82,82) até (122,122) e correspondem a área com superfície plana de uma parede presente na cena.

Primeiramente utilizaram-se imagens TOF adquiridas à distância de 1,30m entre a câmara e a parede, com os tempos de integração iguais a 2000 e 5000 μ s. Posteriormente utilizaram-se imagens TOF obtidas a 2,10m da parede, com tempos de integração iguais a 2000, 5000 e 7000 μ s.

O gráfico de dispersão da Figura 5.9 ilustra uma análise para a captação de imagens TOF com diferentes distâncias e tempos de integração. Os desvios padrão foram calculados para imagens TOF captadas com a câmara CamCube 2.0, onde variaram-se as distâncias e os tempos de integração no momento da aquisição das imagens.

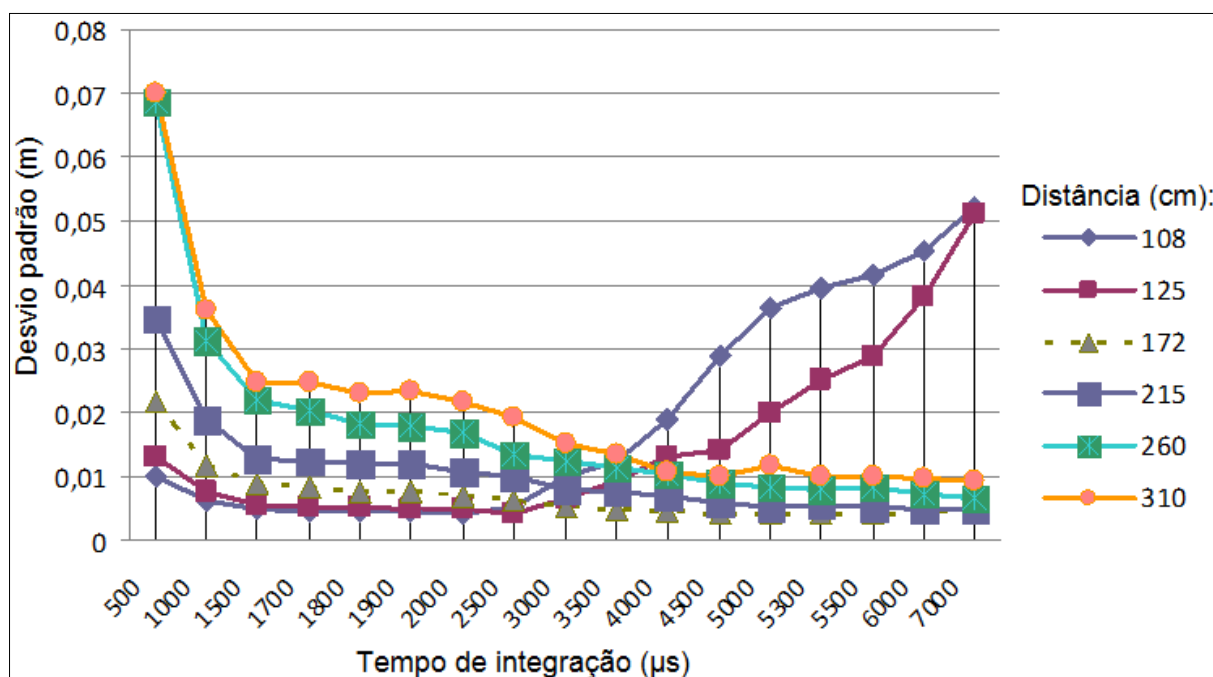


FIGURA 5.9 – Desvios padrão para distância x TI
 FONTE: CENTENO e JUTZI (2010)

Com a Figura 5.10 é apresentado o primeiro resultado deste experimento, o gráfico de dispersão gerado com a imagem TOF adquirida do objeto à distância de 1,30m da câmara com TI igual a 2000 μ s.

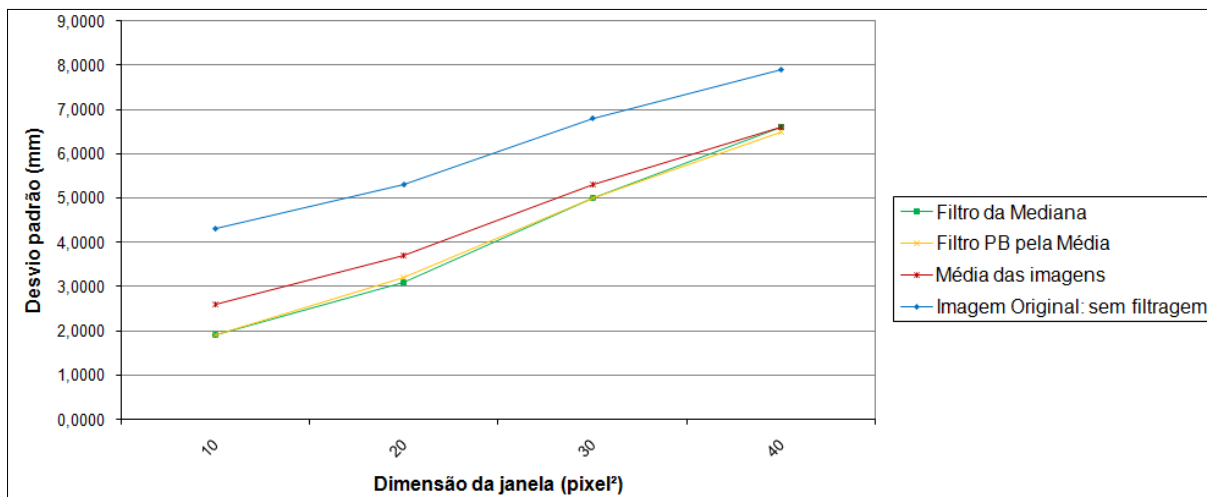


FIGURA 5.10 – Desvios padrão para janelas com TI=2000 μ s, d=1,30m

A Figura 5.11 ilustra as superfícies geradas com o arquivo de distâncias da imagem TOF adquirida do objeto à distância de 1,30m da câmara com TI igual a 2000 μ s e com as imagens resultantes das filtragens realizadas.

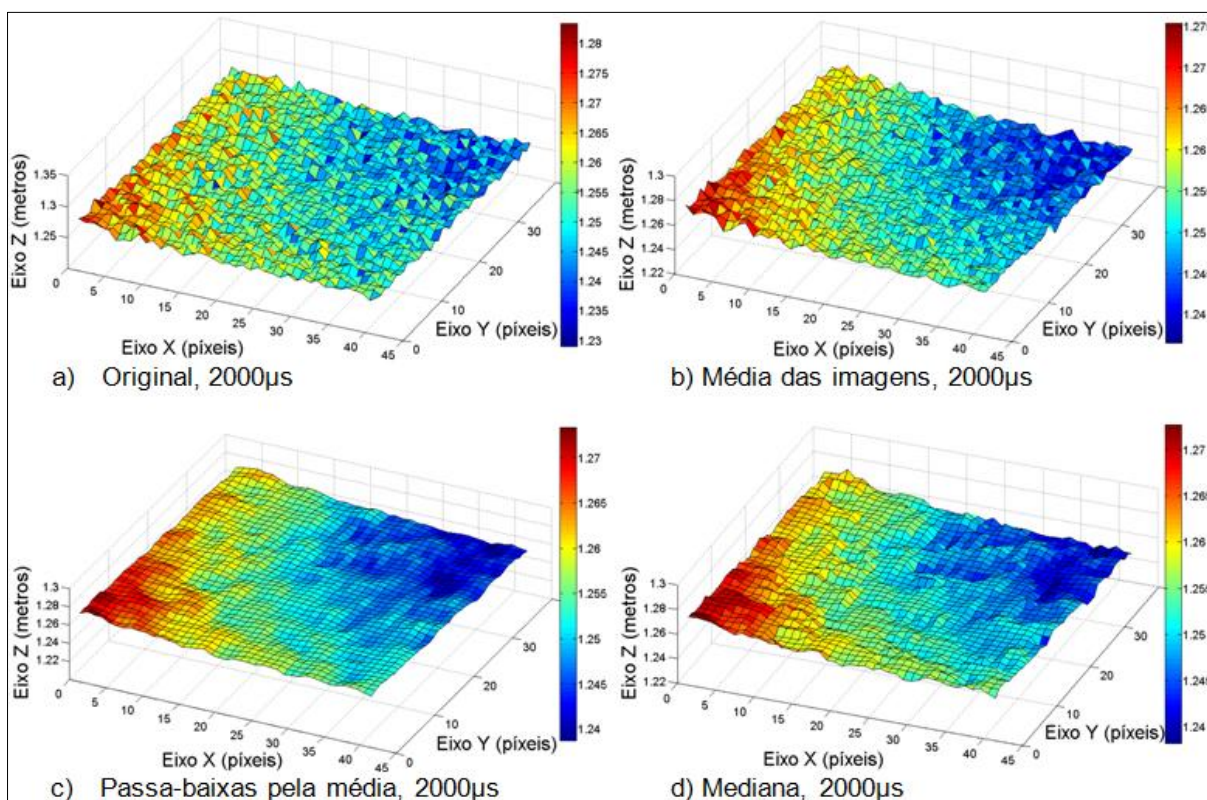


FIGURA 5.11 – Janelas de 40x40 pixels, TI=2000 μ s, d=1,30m

Com a Figura 5.11 conclui-se que os melhores resultados para a suavização dos dados de distância foram obtidos com os filtros passa-baixas pela média e mediana.

A Figura 5.12 ilustra o gráfico de dispersão para a imagem adquirida com TI igual a $5000\mu\text{s}$ com distância de 1,30m entre o objeto imageado e a câmara TOF. A Figura 5.13 ilustra as superfícies geradas com as janelas centrais de 40×40 pixels.

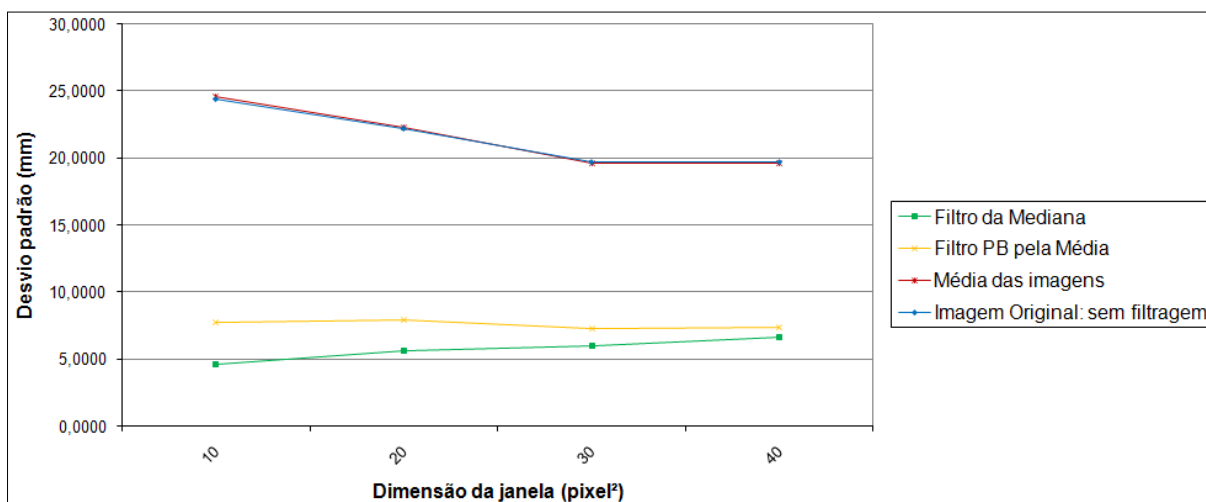


FIGURA 5.12 – Desvios padrão para janelas com $TI=5000\mu\text{s}$, $d=1,30\text{m}$

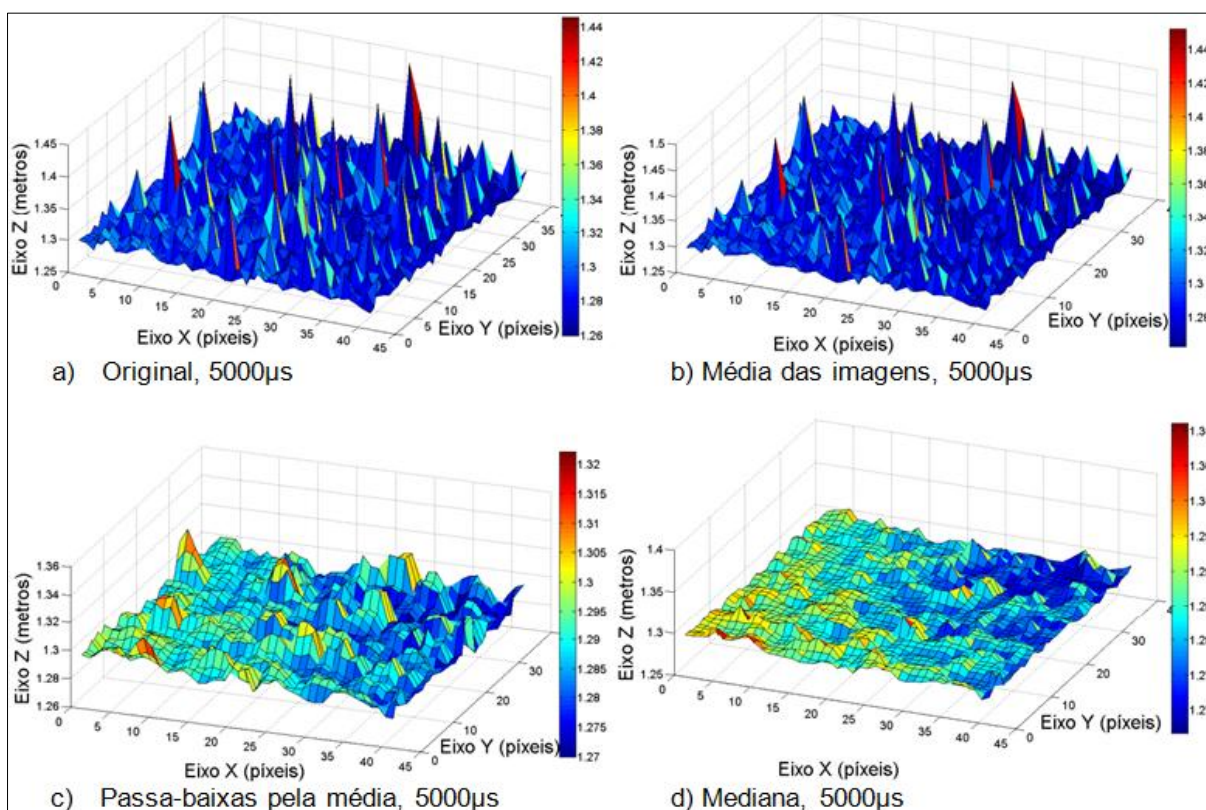


FIGURA 5.13 – Janelas de 40×40 pixels, $TI=5000\mu\text{s}$, $d=1,30\text{m}$

O TI de $5000\mu\text{s}$ utilizado para a aquisição da imagem saturou os elementos do sensor e causou maior presença de ruído nos dados. Comparando as Figuras 5.11 e 5.13, conclui-se que para a distância de 1,30m do sensor o tempo de integração mais adequado para a aquisição da imagem foi $2000\mu\text{s}$.

A Figura 5.14 ilustra o gráfico de dispersão gerado para a imagem TOF obtida com TI igual a $2000\mu\text{s}$ e distância de 2,10m. As superfícies geradas a partir das janelas de 40×40 pixels desta imagem são apresentadas com a Figura 5.15.

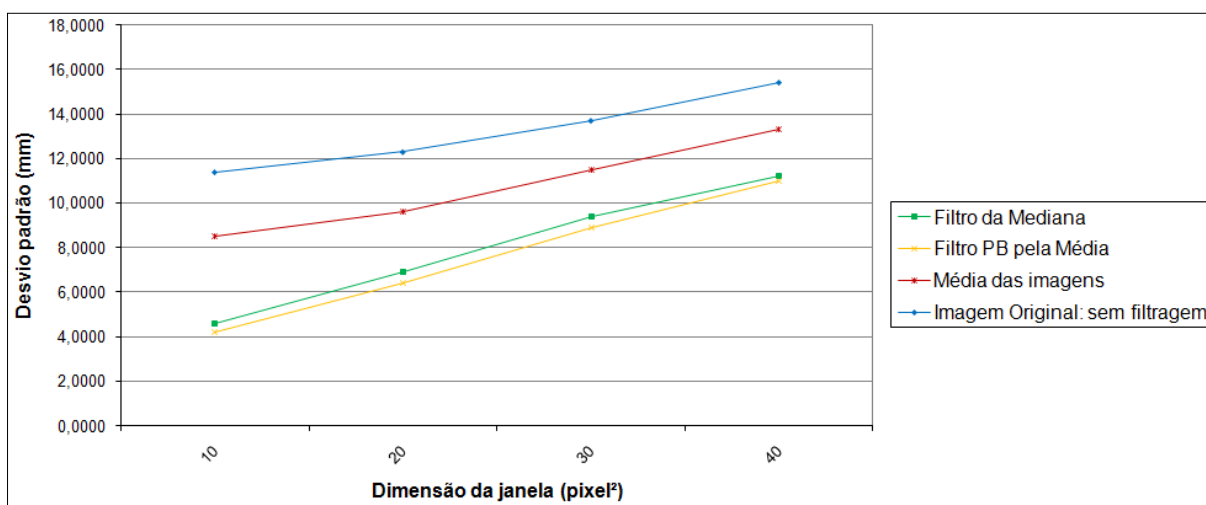


FIGURA 5.14 – Desvios padrão para janelas com $TI=2000\mu\text{s}$, $d=2,10\text{m}$

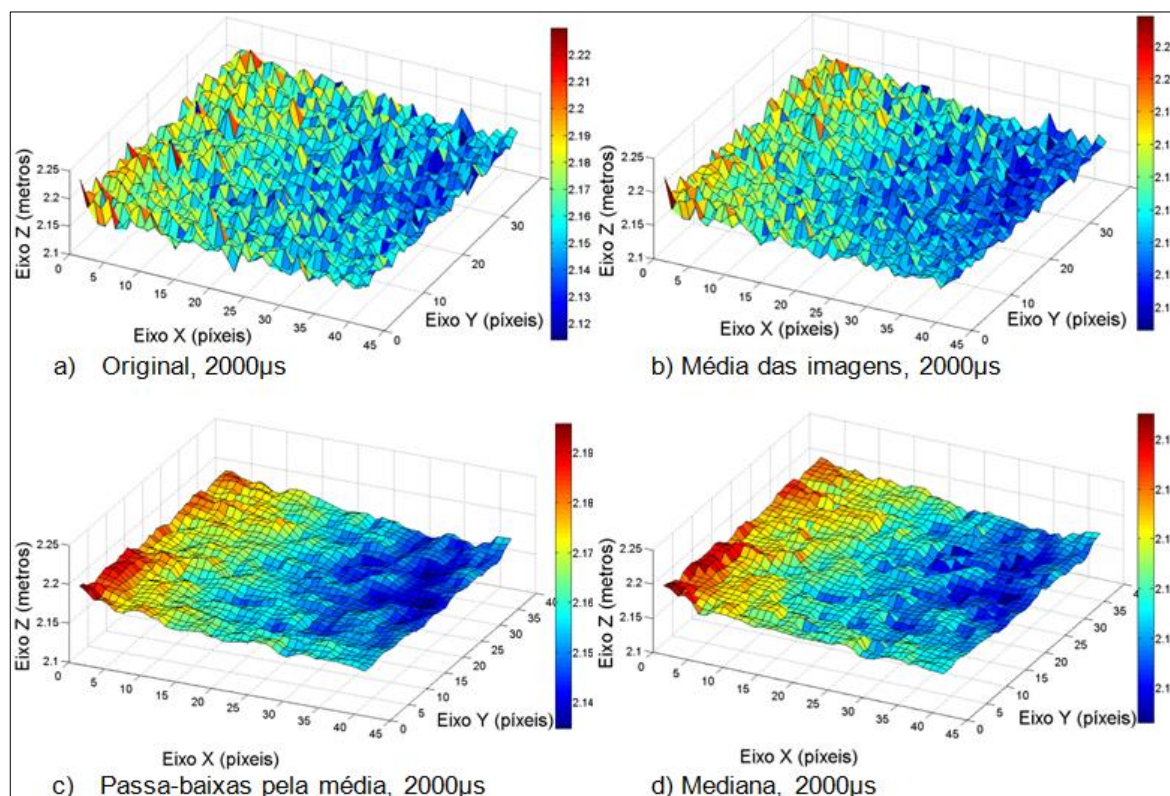


FIGURA 5.15 – Janelas de 40×40 pixels, $TI=2000\mu\text{s}$, $d=2,10\text{m}$

O gráfico de dispersão calculado para a imagem adquirida com TI igual a $5000\mu\text{s}$ e distância de 2,10m é ilustrado com a Figura 5.16.

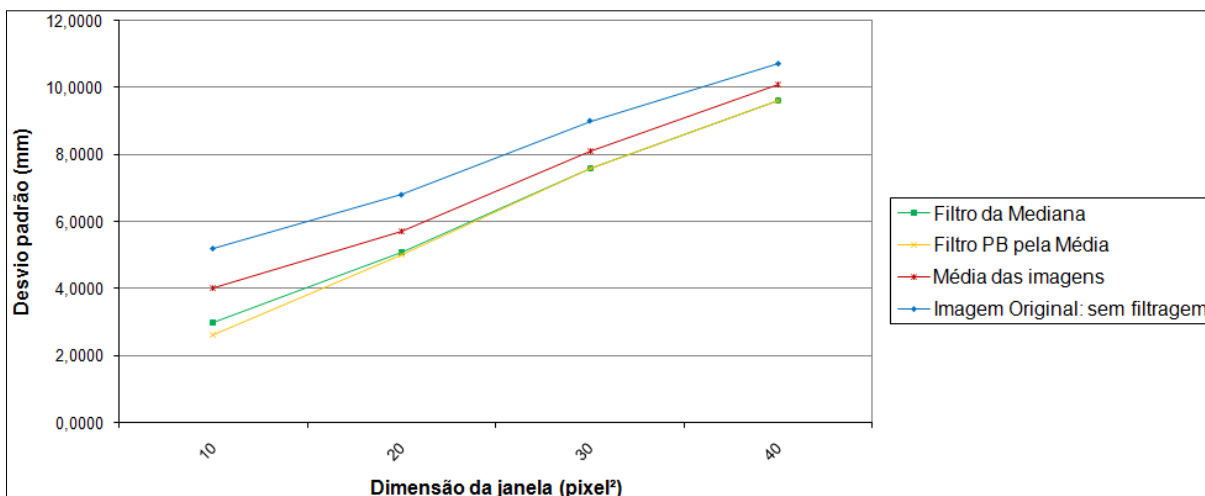


FIGURA 5.16 – Desvios padrão para janelas com $TI=5000\mu\text{s}$, $d=2,10\text{m}$

Os menores desvios padrão foram encontrados na imagem filtrada utilizando os filtros passa-baixas pela média e mediana, conforme pode ser visualizado com a Figura 5.16. Para a janela de 40×40 píxeis, o desvio padrão de 10,7mm na imagem original diminuiu para 9,6mm com a filtragem pela mediana. A Figura 5.17 ilustra as superfícies geradas para a imagem obtida com distância de 2,10m e TI de $5000\mu\text{s}$.

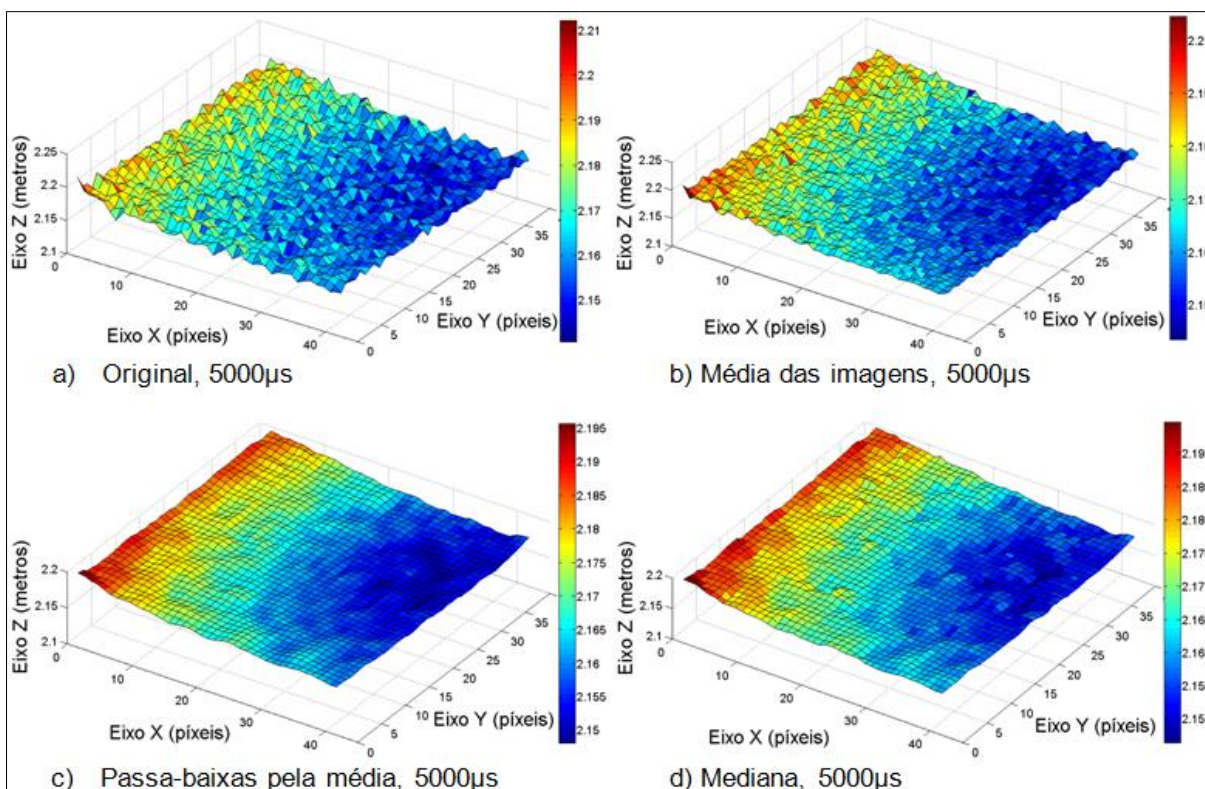


FIGURA 5.17 – Janelas de 40×40 píxeis, $TI=5000\mu\text{s}$, $d=2,10\text{m}$

Com a Figura 5.17 observa-se novamente que os melhores resultados para a suavização da imagem foram obtidos com os filtros passa-baixas pela média e pela mediana.

A Figura 5.18 ilustra o gráfico de dispersão e a Figura 5.19 ilustra as superfícies geradas para as imagens adquiridas com distância de 2,10m e TI igual a 7000 μ s.

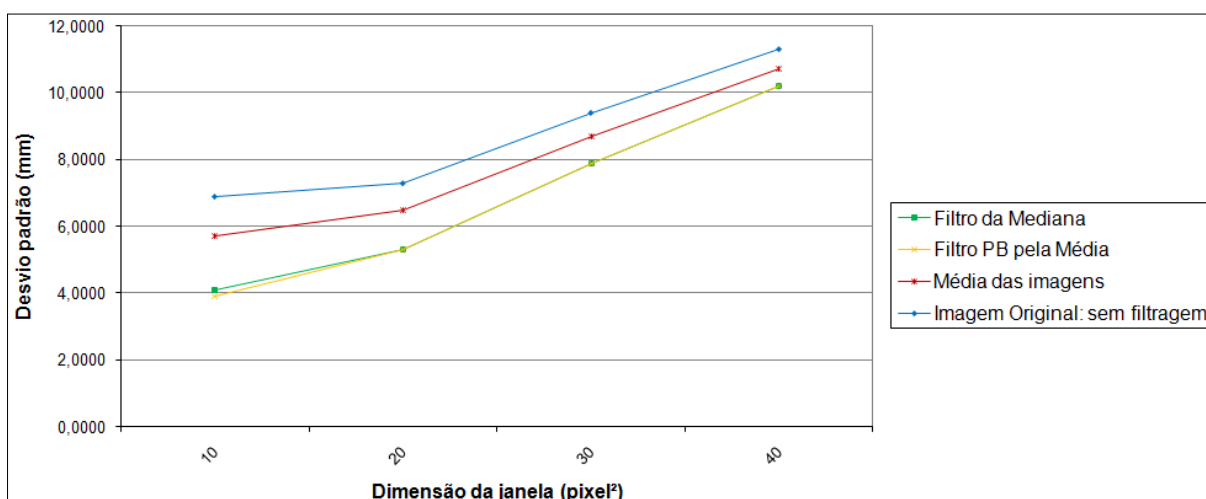


FIGURA 5.18 – Desvios padrão para janelas com TI=7000 μ s, d=2,10m

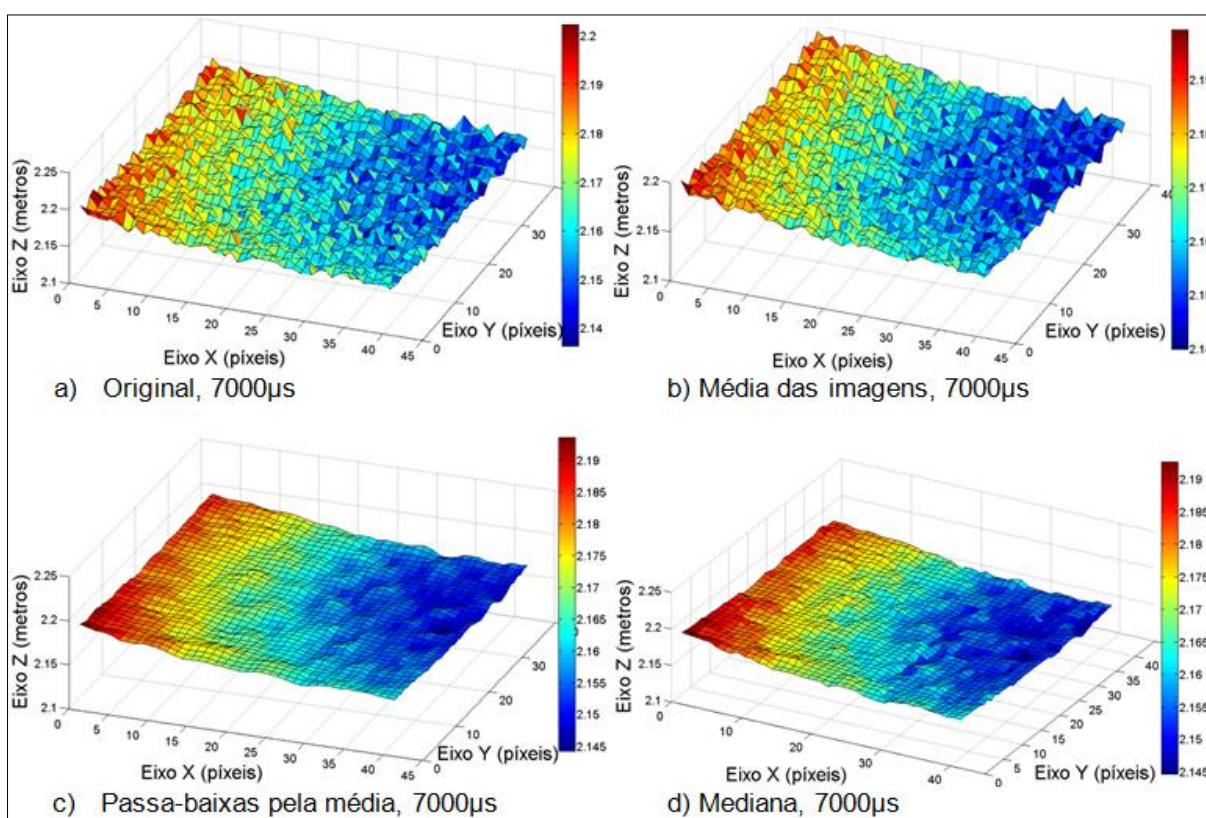


FIGURA 5.19 – Janelas de 40x40 pixels, TI=7000 μ s, d=2,10m

Com o gráfico de dispersão ilustrado com a Figura 5.18 observa-se que os desvios padrão calculados para as imagens obtidas com os filtros passa-baixas pela média e mediana, são maiores do que os desvios apresentados com o gráfico de dispersão ilustrado com a Figura 5.16. Isto indica que as imagens captadas da parede plana com TI igual a 7000 μ s e distância de 2,10m, apresentaram maior ruído que as imagens obtidas com 5000 μ s.

Comparando as Figuras 5.19 e 5.17 verifica-se que a imagem captada com TI igual a 5000 μ s com distância de 2,10m e filtrada com o filtro passa-baixas pela média e também com a mediana, apresentou-se mais suavizada do que a imagem obtida com TI igual a 7000 μ s.

Comparando as imagens captadas com tempo de integração de 2000 μ s e 5000 μ s para a distância de 2,10m, conforme Figuras 5.15 e 5.17, conclui-se que as imagens obtidas com TI de 5000 μ s apresentaram menor presença de ruído.

5.4 EXPERIMENTO 3 – PROJEÇÃO ORTOGONAL DOS PONTOS

Obtidos os POI através do processo de calibração da câmara e definido o melhor TI para a captação da imagem procedeu-se a um novo experimento, no qual se analisou a imagem de uma caixa com superfícies planas. A superfície do objeto em questão é composta por papel branco, rígido e refletivo. A caixa foi colocada sobre uma cadeira à distância aproximada de 1,3m da câmara. Esta cadeira foi girada, enquanto a câmara continuou fixa, com o mesmo ponto de vista. Com base no estudo da dispersão dos dados em função da distância ao objeto, optou-se por utilizar o TI de 2000 μ s para a captação das imagens. Foram então adquiridas dez imagens do objeto.

Com a distância do objeto em relação à câmara igual a 1,3m e com a distância focal calibrada da câmara de 13,2mm, valor encontrado com a Equação (5.7), calculou-se a escala aproximada das fotografias, encontrando-se o valor aproximado para a escala igual a 1:100, conforme Equação (5.8).

$$f_c = \frac{f_{xc} + f_{yc}}{2} = \frac{13,15823 \text{ mm} + 13,21383 \text{ mm}}{2} = 13,18603 \text{ mm} \cong 13,2 \text{ mm} \quad (5.7)$$

$$E = \frac{d}{D} = \frac{f_c}{Z} = \frac{13,2mm}{1,3m} = \frac{0,0132m}{1,3m} = \frac{1}{98,4848} \cong \frac{1}{100} \quad (5.8)$$

Para realizar este experimento selecionou-se a terceira imagem captada, por apresentar vista perspectiva de três superfícies com padrão planar no objeto imageado. A Figura 5.20a ilustra o arquivo de intensidades da imagem TOF sem correção geométrica. A Figura 5.20b ilustra o arquivo de intensidade corrigido geometricamente utilizando as coordenadas do Ponto Principal x_0 e y_0 , os coeficientes de distorção Radial Simétrica K_1 e K_2 e a distância focal calibrada f_c .

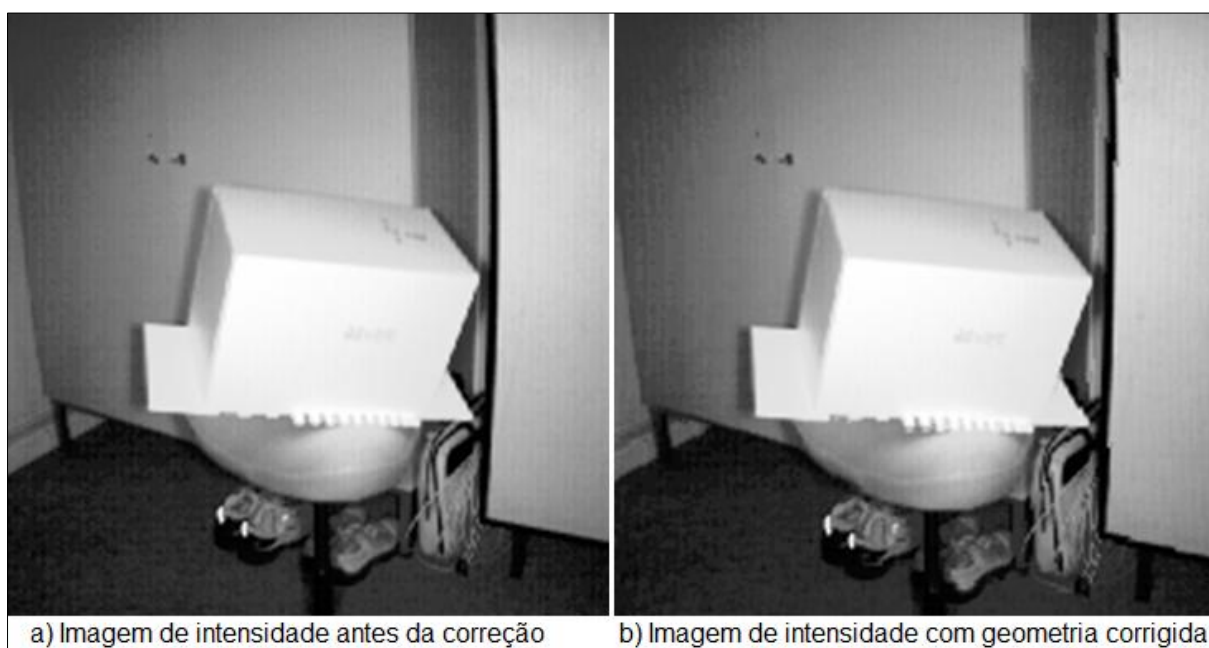


FIGURA 5.20 – Arquivo de intensidades da imagem TOF obtida do objeto

Após a correção da geometria da imagem TOF geraram-se as superfícies do objeto. Isto foi feito a partir do arquivo de distâncias da imagem TOF, conforme é ilustrado com a Figura 5.21, onde se tem as distâncias dos pontos em relação ao sensor representadas com a coordenada Z, em metros, sobre a imagem TOF com dimensão de 204x204 píxeis.

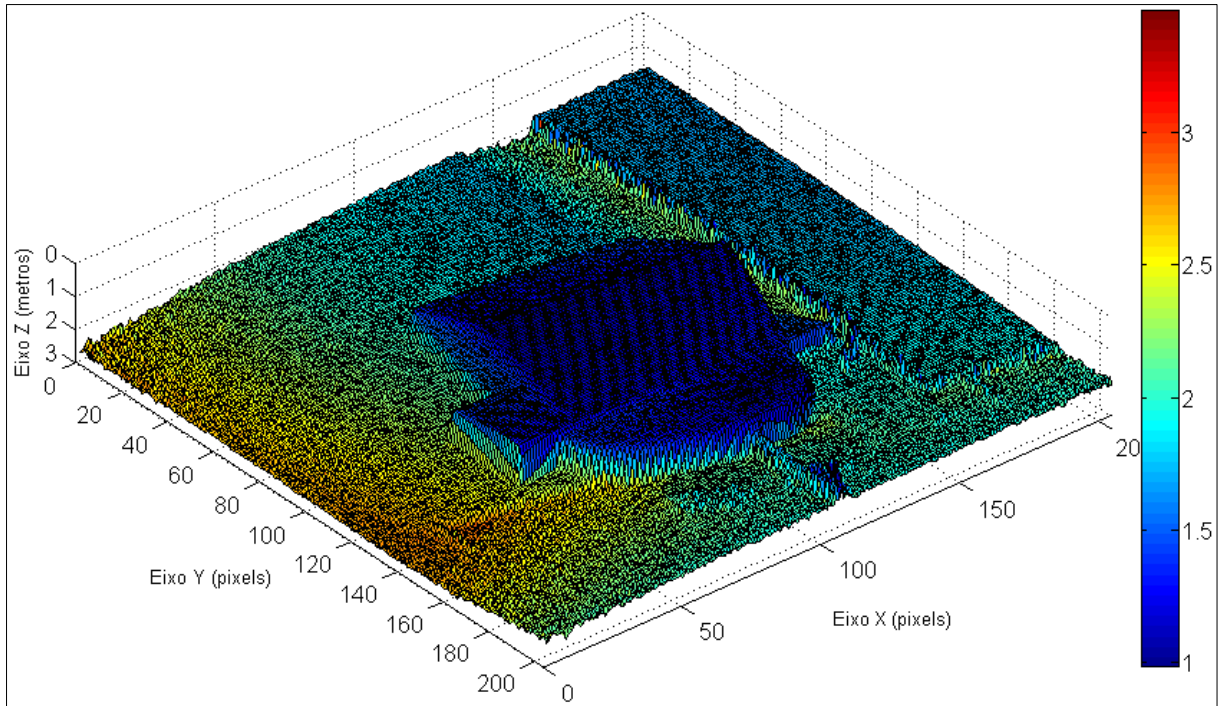


FIGURA 5.21 – Arquivo de distâncias da imagem TOF com geometria corrigida

A partir do arquivo de distâncias da imagem TOF com a geometria dos dados corrigida, projetaram-se ortogonalmente os pontos gerando a nuvem de pontos 3D ilustrada com a Figura 5.22 em vista frontal, com o eixo Z ortogonal aos eixos X e Y representados.

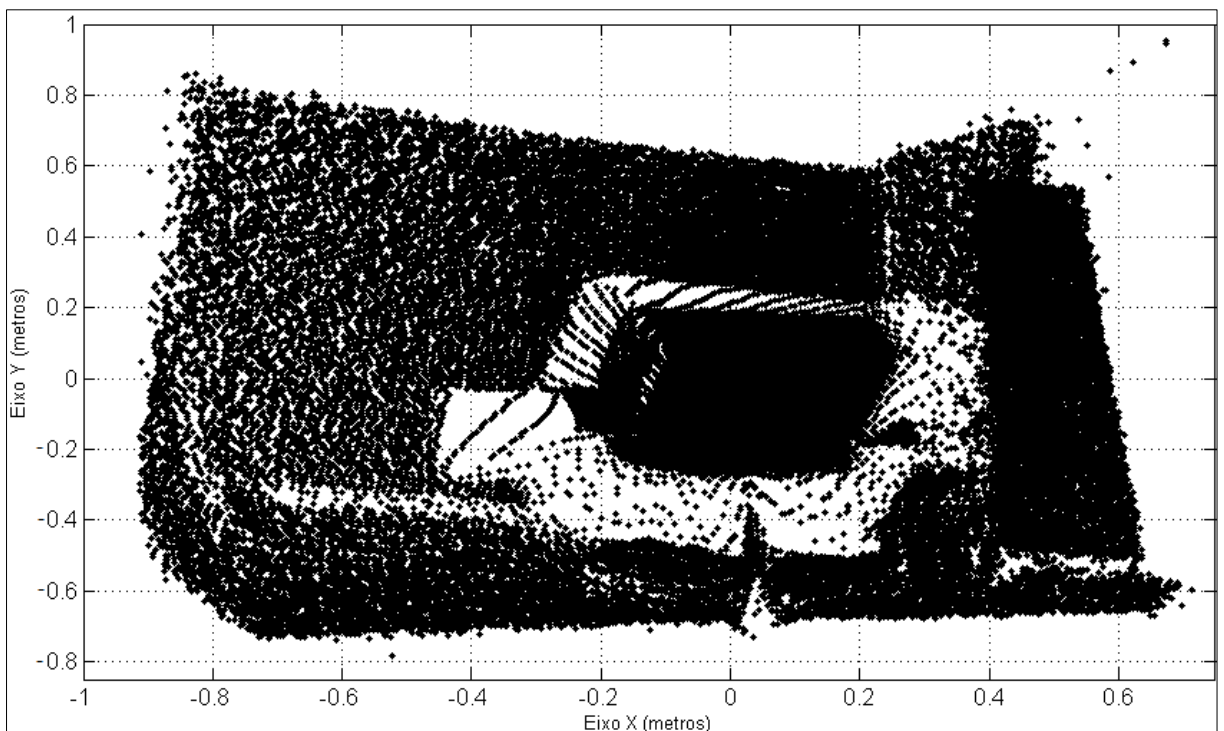


FIGURA 5.22 – Nuvem de pontos, vista frontal

A vista em perspectiva tridimensional da nuvem de pontos do objeto de estudo é ilustrada com a Figura 5.23. Contém 42025 pontos gerados a partir da imagem TOF de 204x204 píxeis obtida com a câmara PMD CamCube 2.0.

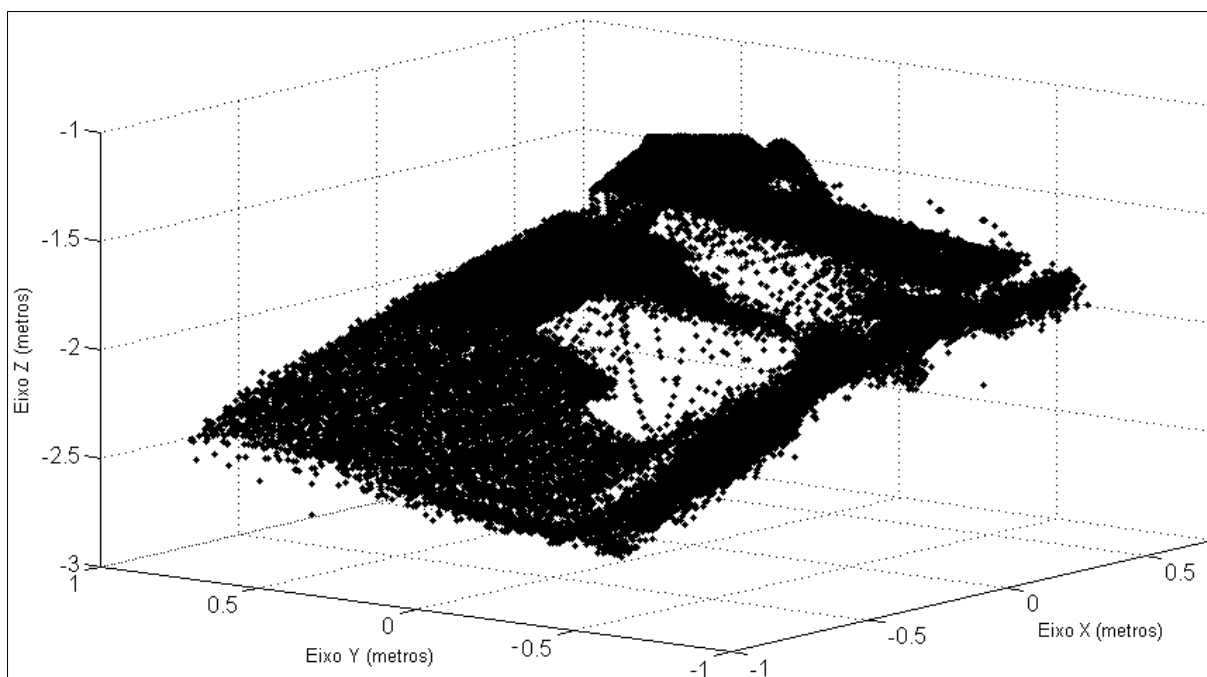


FIGURA 5.23 - Nuvem de pontos, vista perspectiva 3D

5.5 EXPERIMENTO 4 – SEGMENTAÇÃO 1: CRESCIMENTO DE REGIÕES

Realizou-se a segmentação por crescimento de regiões a partir de três pontos semente. Estes pontos foram escolhidos em áreas uniformes no arquivo de intensidades da imagem TOF corrigida geometricamente e foram projetados ortogonalmente para a nuvem 3D. As coordenadas de imagem destes pontos foram observadas nas posições indicadas com a Figura 5.24.

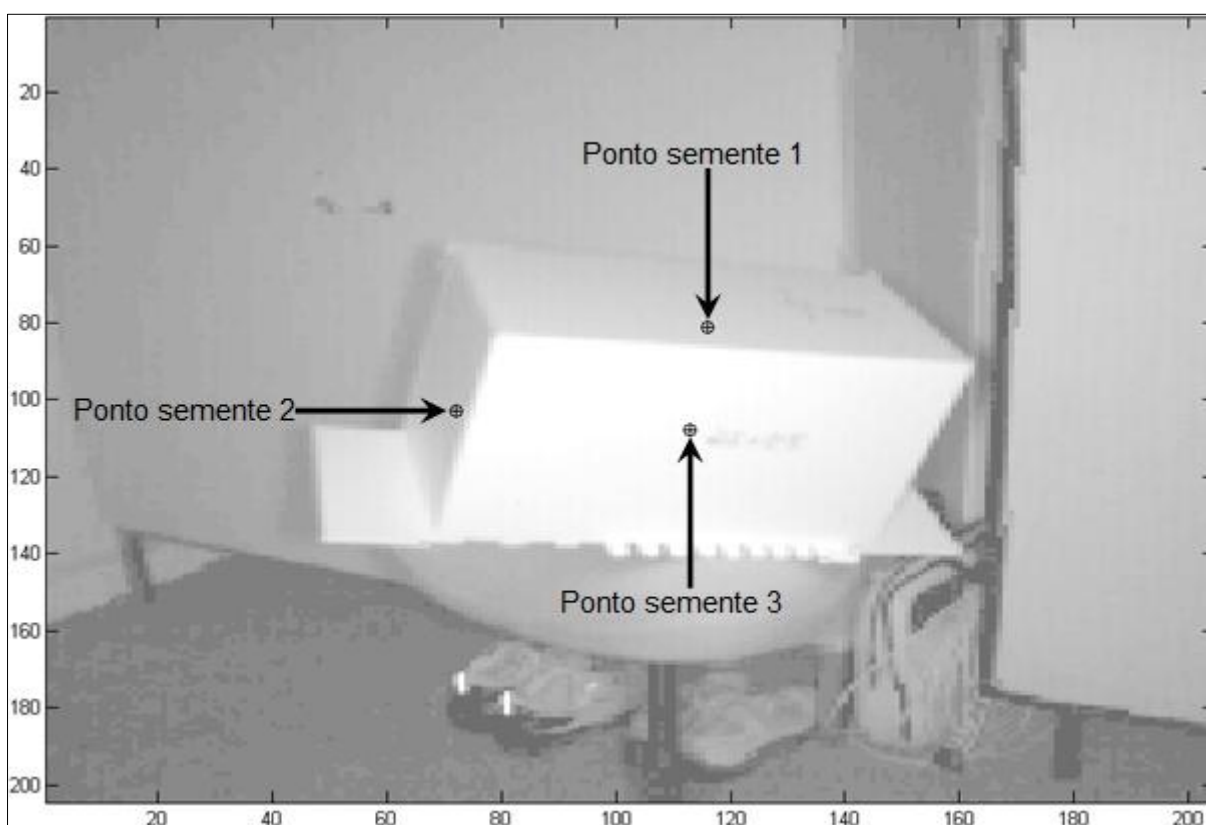


FIGURA 5.24 – Pontos semente no arquivo de intensidades da imagem TOF

Os pontos semente foram escolhidos em três superfícies planas da caixa em locais que apresentavam valores de intensidade uniforme. As coordenadas de imagem lidas em píxeis para estes três pontos foram: Ponto 1 (116,81); Ponto 2 (72,103); Ponto 3 (113,108).

As Figuras 5.25 e 5.26 ilustram o crescimento em três regiões realizados na nuvem de pontos 3D. Estes pontos correspondem às superfícies frontal, superior e lateral da caixa, ilustradas com as cores amarela, verde e ciano, respectivamente. Os três autovetores calculados são ilustrados com a cor azul, ortogonais aos pontos semente escolhidos nas três superfícies da imagem de intensidade.

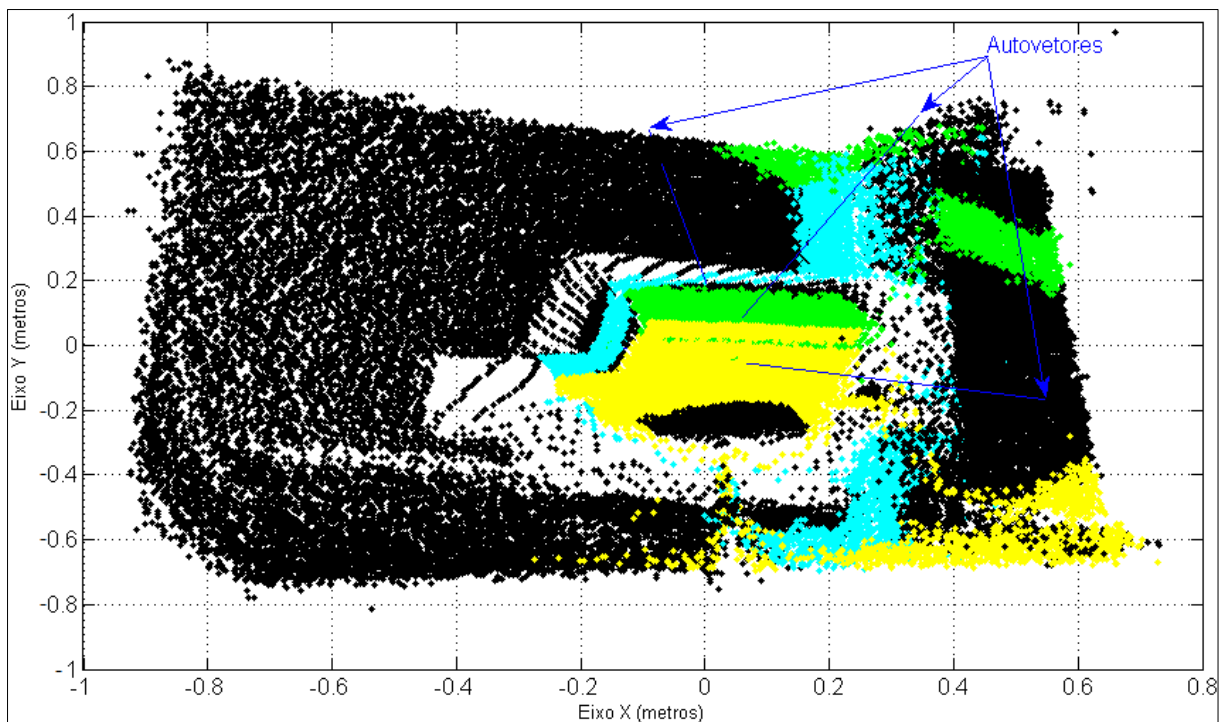


FIGURA 5.25 – Crescimento de regiões, vista frontal

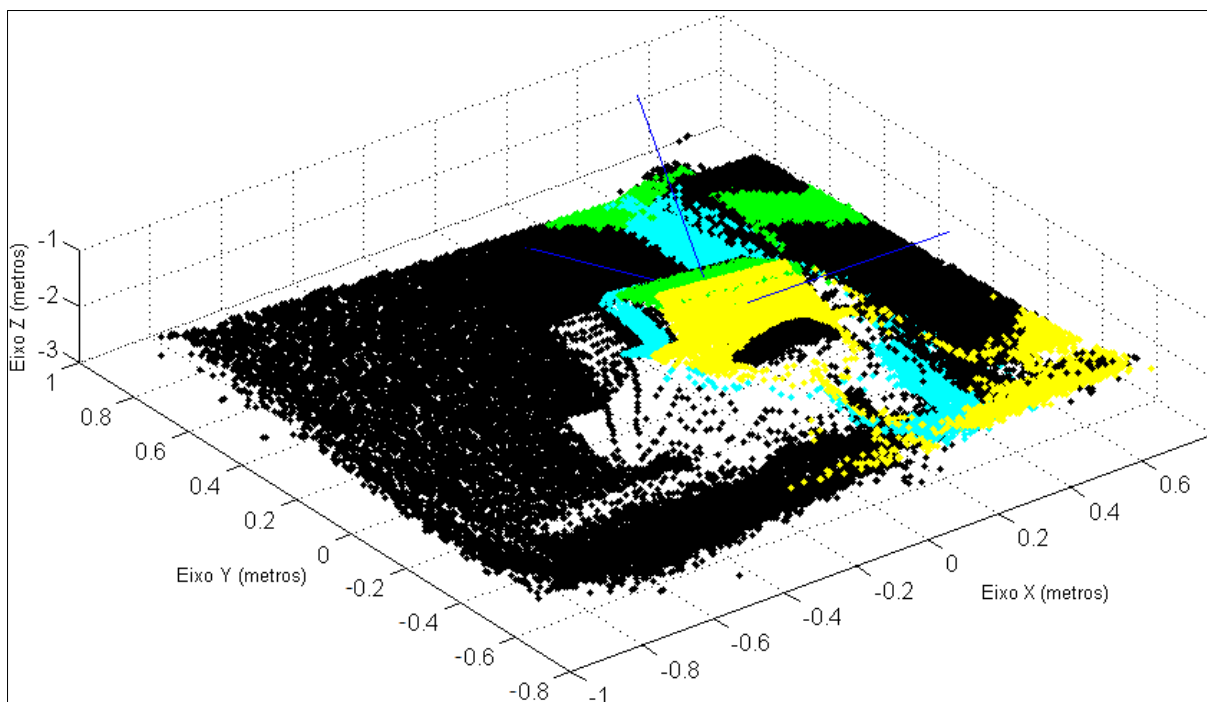


FIGURA 5.26 – Crescimento de regiões, vista perspectiva 3D

Com as Figuras 5.25 e 5.26 verifica-se que o crescimento das regiões ocorreu de forma coerente, acompanhando o padrão planar das superfícies do objeto de estudo. No entanto, nas três superfícies analisadas houve crescimento de regiões para fora dos limites de suas áreas. Pontos de superfícies ao fundo e abaixo do objeto foram incluídos nas regiões. Isto ocorreu devido à utilização do critério de

similaridade de distância do ponto à superfície plana, sendo esta superfície definida pelos pontos semente. A distância foi medida ao longo do autovetor, o que fez com que pontos de outras superfícies paralelas a superfície plana em questão fossem agrupados na mesma região. Ou seja, pontos que estavam orientados na direção da superfície plana definida pelo autovalor que passa pelo ponto semente e que estavam dentro do limiar de distância estabelecido foram incluídos nas regiões, mesmo não pertencendo à superfície analisada.

5.6 EXPERIMENTO 5 – SEGMENTAÇÃO 2: ANÁLISE COM AUTOVALORES

Neste experimento realizou-se a segmentação da imagem TOF por análise da variação local de autovalores locais de superfícies. O arquivo de distâncias desta imagem foi utilizado como ponto de partida para o cálculo dos autovalores com o objetivo de intensificar as bordas dos objetos presentes na cena.

O processamento consistiu em definir uma pequena vizinhança quadrada, uma janela móvel, e utilizar as coordenadas tridimensionais dos pontos nesta vizinhança para o cálculo dos autovalores.

Após a normalização os autovalores foram armazenados na forma de três novas imagens, conforme pode ser visualizado com as Figuras 5.27, 5.28 e 5.29. Para a geração destas imagens utilizou-se a janela móvel com dimensão de 3x3 píxeis para o cálculo dos autovalores.

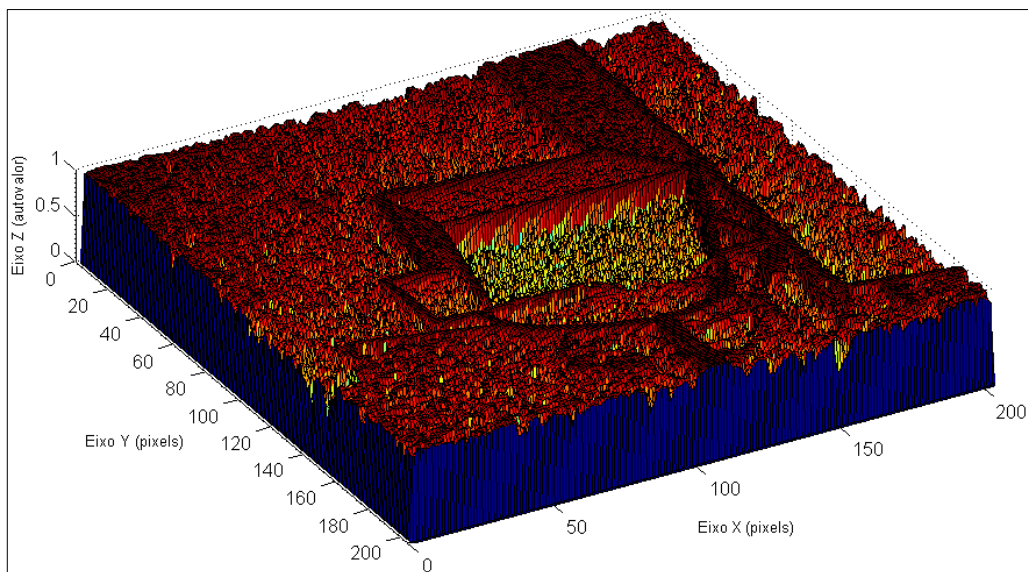


FIGURA 5.27 – Imagem com bordas intensificadas gerada com λ_1

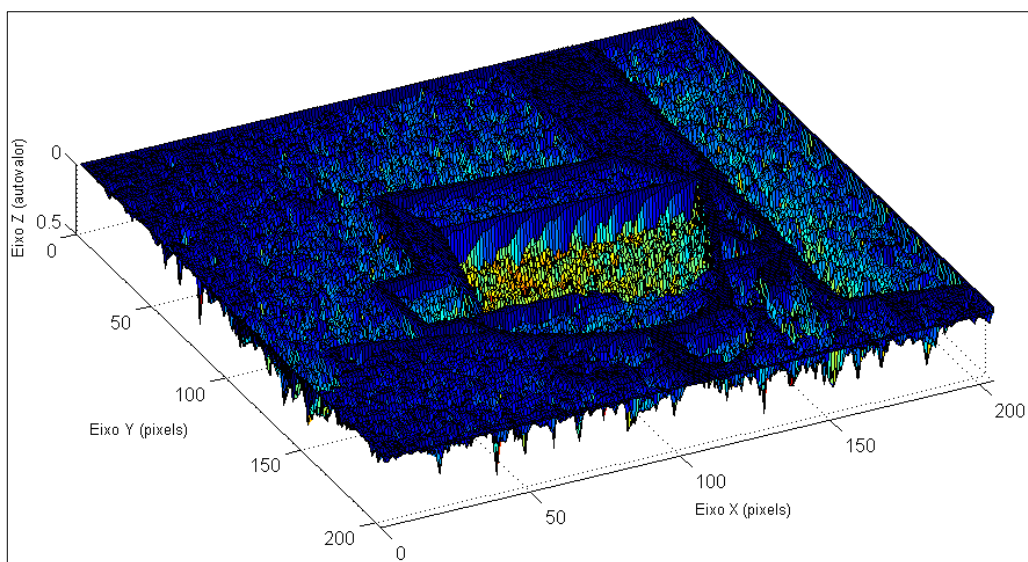


FIGURA 5.28 – Imagem com bordas intensificadas gerada com λ_2

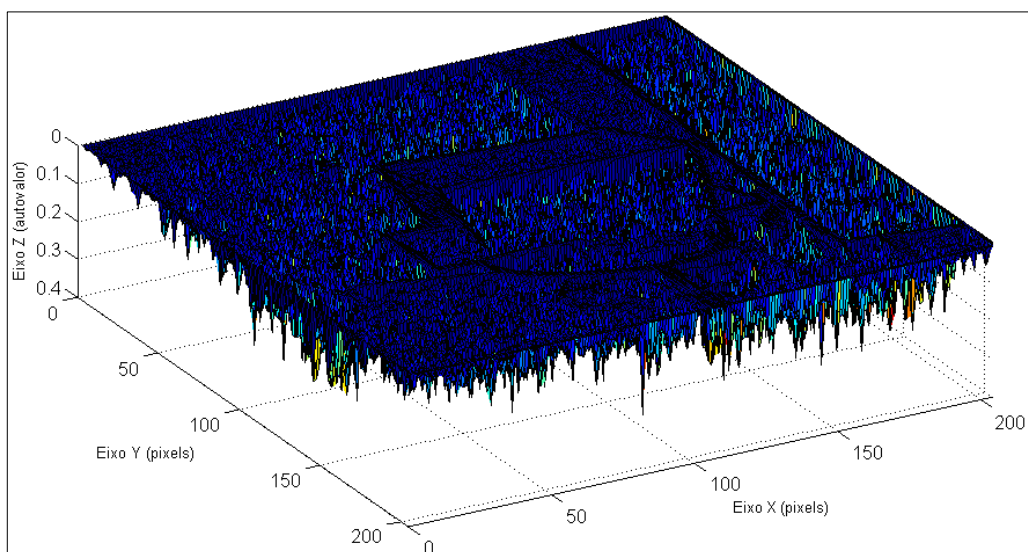


FIGURA 5.29 – Imagem com bordas intensificadas gerada com λ_3

A partir da imagem com bordas intensificadas gerada com os autovalores locais foi possível criar uma nova imagem de intensidade, que também estava com as bordas dos objetos intensificadas. A Figura 5.30 ilustra as imagens de intensidade com bordas intensificadas que foram geradas utilizando o segundo autovalor calculado a partir de janelas com as seguintes dimensões: a) 3x3; b) 5x5; c) 7x7; d) 9x9; e) 11x11; f) 13x13 píxeis.

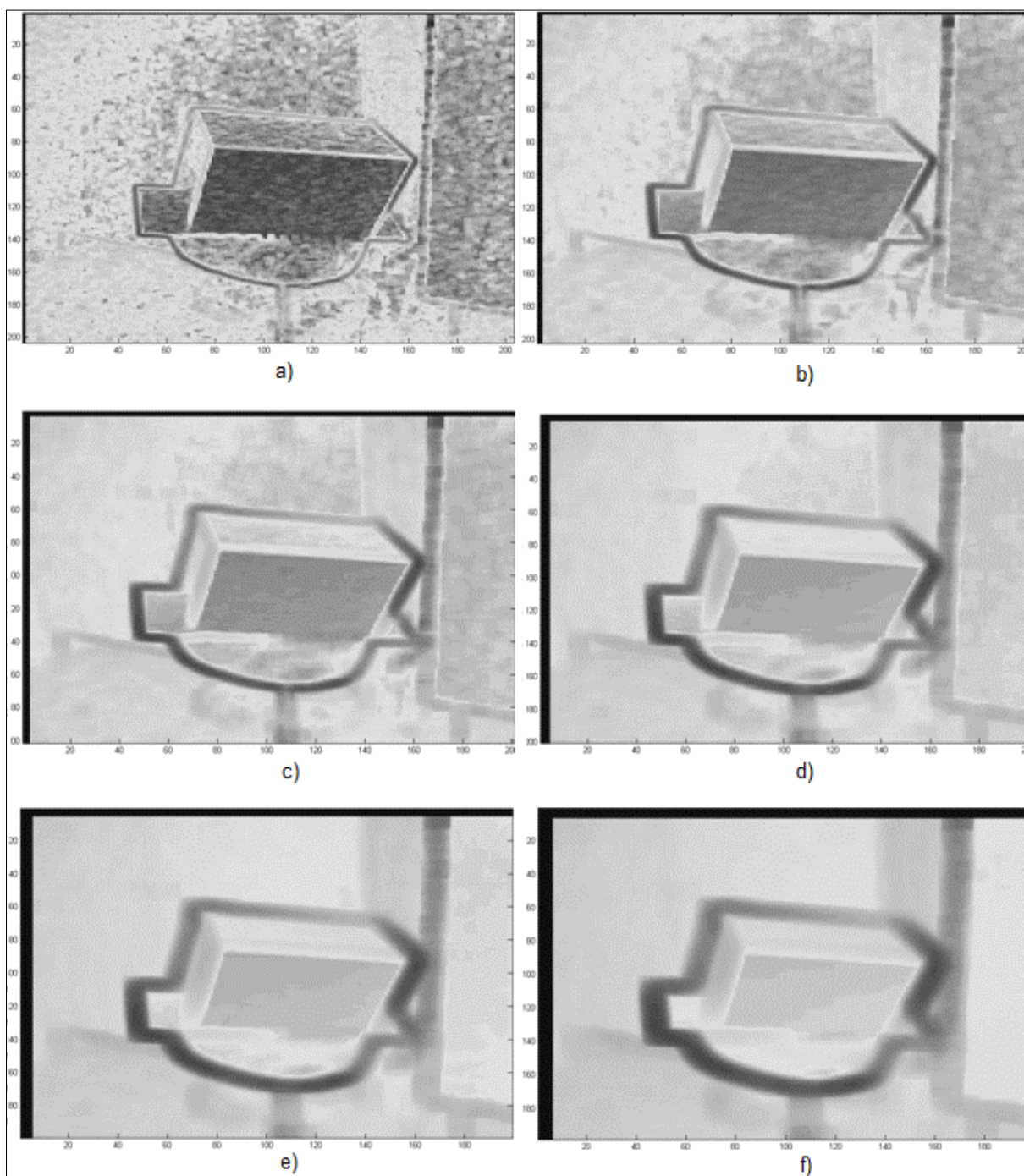


FIGURA 5.30 – Imagens de intensidade com as bordas do objeto intensificadas

Com as imagens de intensidade ilustradas com a Figura 5.30 observou-se que aumentando a quantidade de píxeis da janela utilizada para o cálculo dos autovalores da região, aumentou-se também a suavização sobre as superfícies planas e alargaram-se as bordas que limitam os objetos contidos na cena.

Para este experimento utilizou-se a imagem gerada com a janela de 3x3 píxeis e com o segundo autovalor. Esta imagem foi escolhida por apresentar linhas finas limitando as bordas do objeto. A imagem de intensidade com as bordas do objeto intensificadas foi segmentada utilizando o algoritmo de deslocamento pela média. O resultado da segmentação é ilustrado com a Figura 5.31.

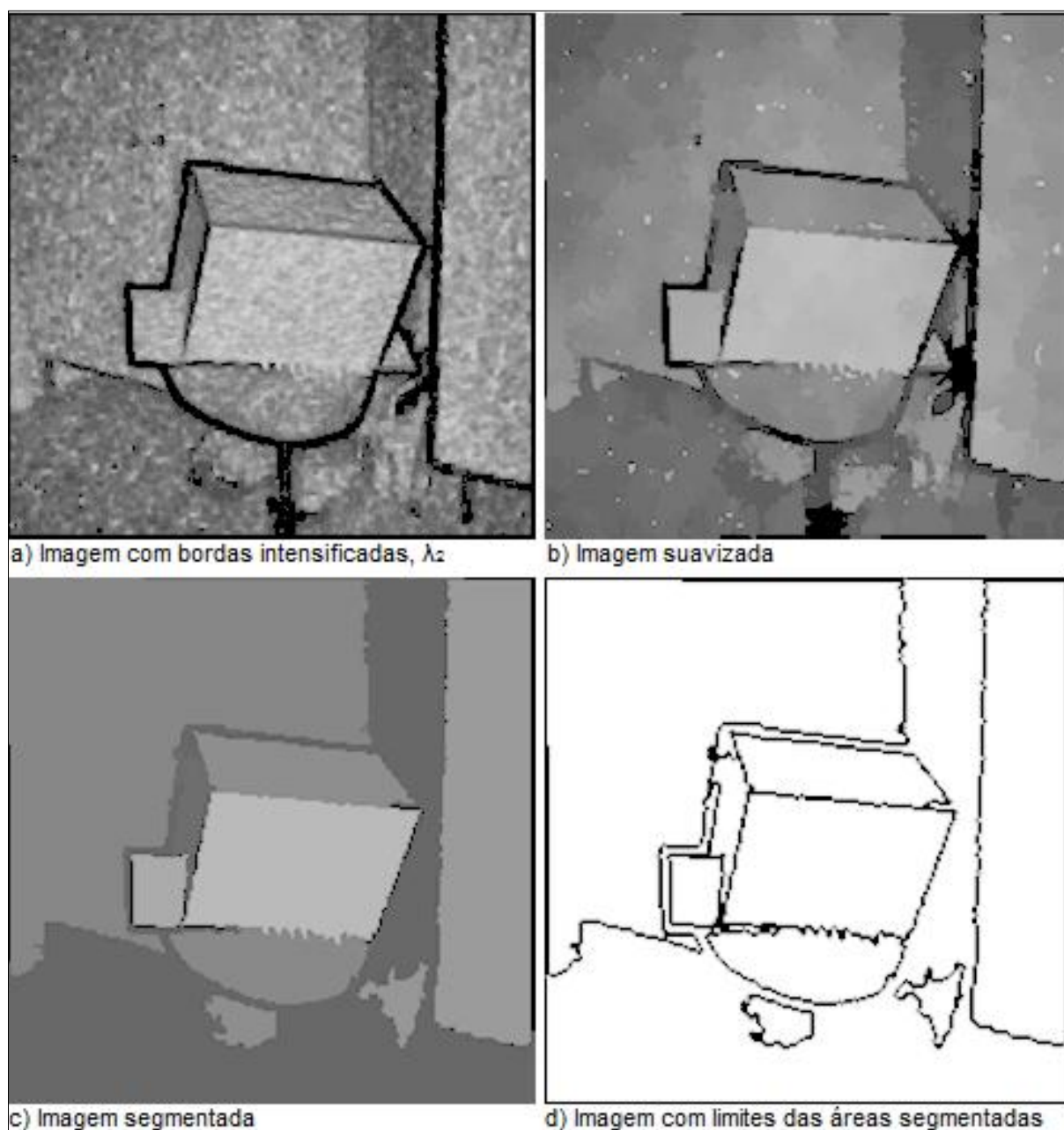


FIGURA 5.31 – Imagem com bordas intensificadas segmentada

A Figura 5.31a ilustra a imagem com bordas intensificadas a ser segmentada, gerada com o segundo conjunto de autovalores λ_2 . Na Figura 5.31b tem-se esta imagem suavizada por filtragem. A Figura 5.31c corresponde à imagem segmentada com o algoritmo de deslocamento pela média. A imagem com os limites das áreas segmentadas é ilustrada com a Figura 5.31d.

A segmentação foi realizada utilizando o *software* EDISON, com os parâmetros $(h_s, h_r, H) = (7, 9, 300)$. Estes parâmetros correspondem ao domínio espacial da imagem h_s , domínio de características h_r , e tamanho mínimo das regiões H em píxeis. O limite mínimo foi fixado para evitar que regiões muito pequenas fossem incluídas na segmentação.

Com a imagem segmentada da Figura 5.29c, foi possível projetar os pontos de interesse ortogonalmente, gerando a nuvem de pontos 3D. Para isto utilizou-se as coordenadas dos píxeis no arquivo de intensidades, e seus correspondentes no arquivo de distâncias da imagem TOF. Estes pontos foram escolhidos sobre as superfícies da caixa. A nuvem de pontos 3D resultante deste experimento é apresentada com as Figuras 5.32 e 5.33.

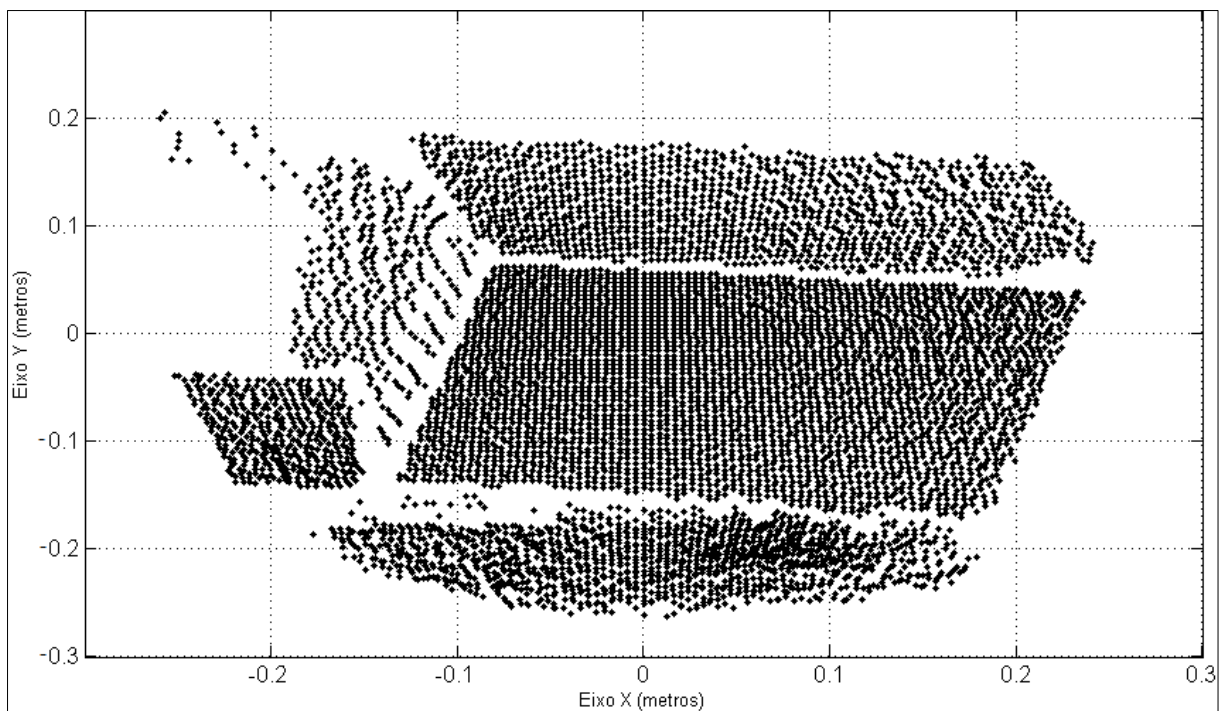


FIGURA 5.32 – Nuvem de pontos da imagem segmentada, vista frontal

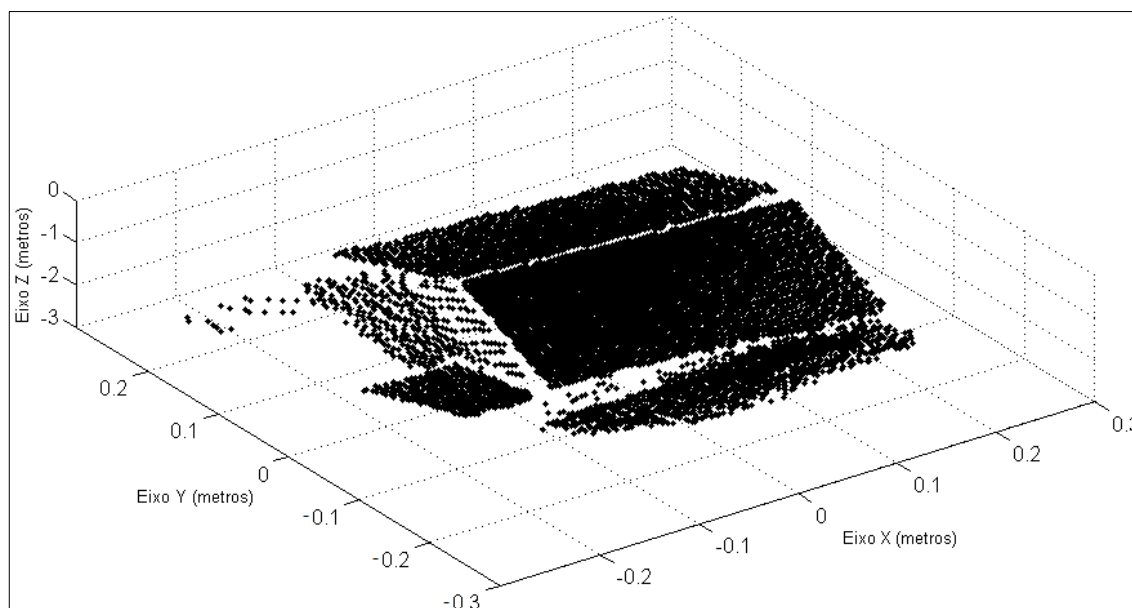


FIGURA 5.33 – Nuvem de pontos da imagem segmentada, vista 3D

5.7 EXPERIMENTO 6 – ANÁLISE DAS MEDIDAS OBTIDAS

Para gerar a nuvem de pontos 3D com as superfícies de interesse, primeiramente corrigiu-se a geometria do arquivo de distâncias da imagem TOF com as coordenadas do Ponto Principal x_0 e y_0 , coeficientes de distorção Radial Simétrica K_1 e K_2 e distância focal calibrada f_c . O passo seguinte foi gerar uma imagem de intensidade com as bordas do objeto intensificadas. Com este objetivo calcularam-se os autovalores para os pontos do arquivo de distâncias da imagem TOF e geraram-se três imagens novas, correspondendo aos três autovalores calculados, conforme o Experimento 5. O terceiro passo foi a segmentação da imagem de intensidade com bordas intensificadas utilizando o algoritmo de deslocamento pela média. Com a imagem segmentada pôde-se escolher as superfícies que teriam seus píxeis projetados para a nuvem de pontos 3D.

A imagem segmentada com o algoritmo de deslocamento pela média apresenta níveis de cinza diferentes para os píxeis de cada segmento. Com isto foi possível separar os pontos que compõem as superfícies por seus valores digitais. A Figura 5.34 apresenta a nuvem de pontos 3D gerada com a imagem TOF corrigida geometricamente, com os pontos da superfície frontal representados com a cor azul.

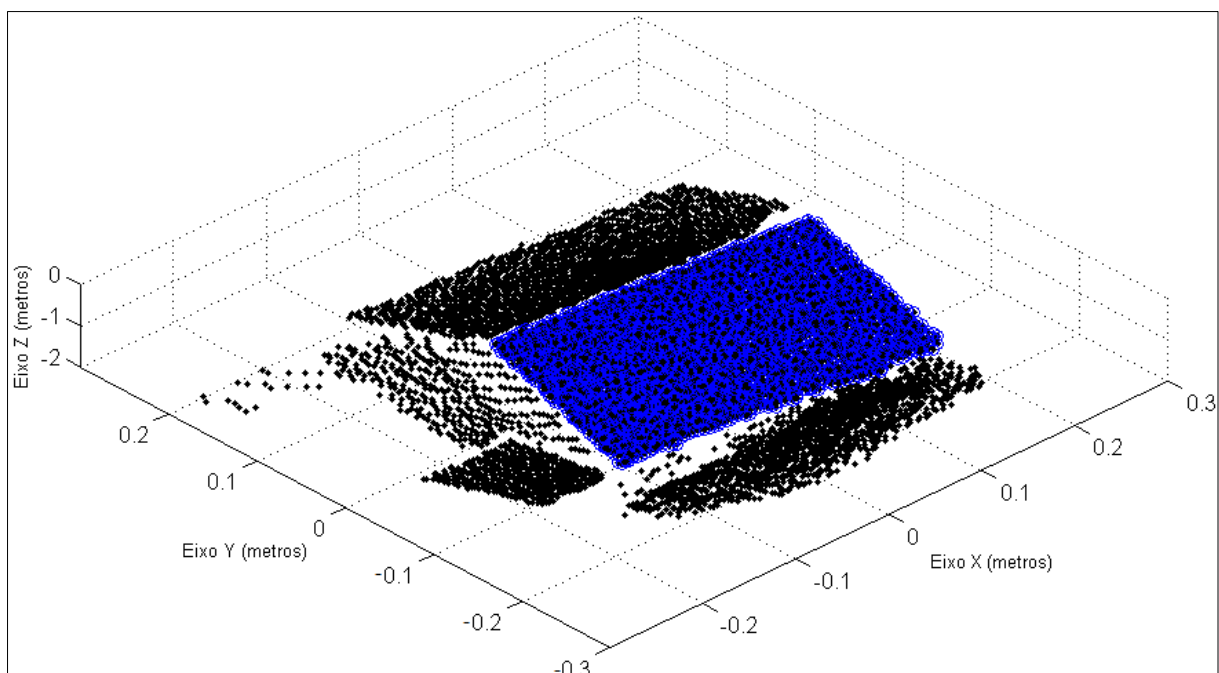


FIGURA 5.34 – Nuvem de pontos 3D segmentada

A superfície frontal foi projetada com atributo de cor diferenciado por apresentar a melhor segmentação na imagem de intensidade e pontos bem definidos na nuvem 3D. A partir desta superfície escolheram-se os pontos extremos, os vértices do objeto, para a leitura de suas coordenadas 3D com o objetivo de calcular o comprimento das arestas. Com a Figura 5.35 são ilustrados os quatro pontos selecionados.

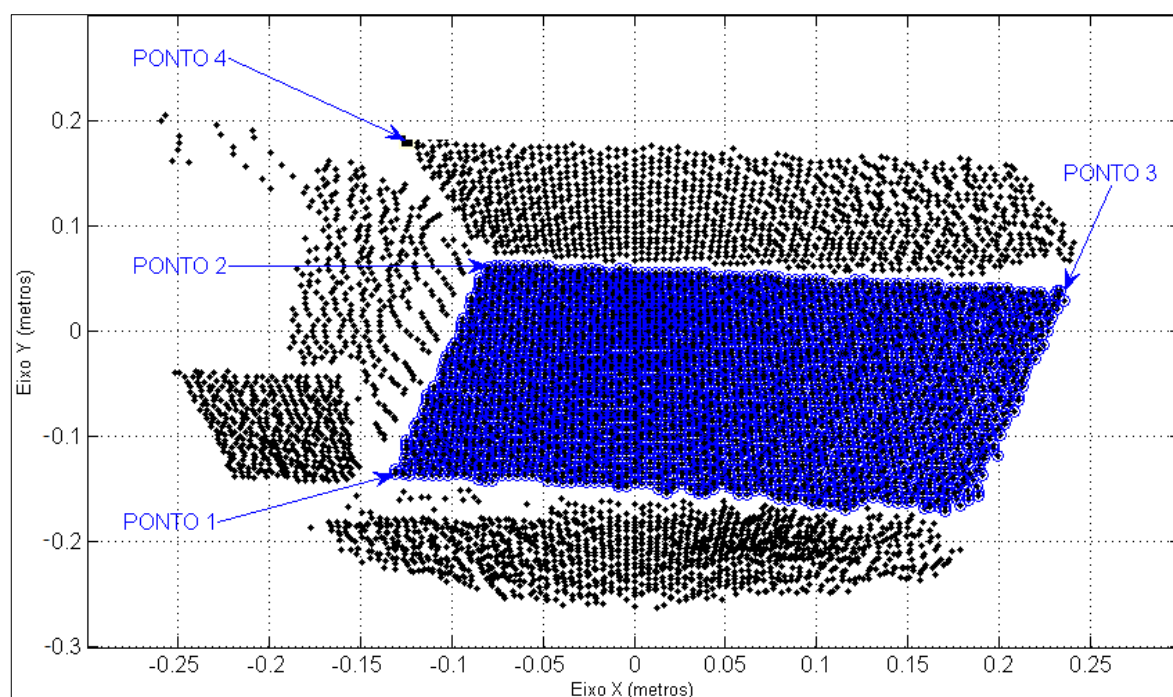


FIGURA 5.35 – Pontos 3D selecionados na nuvem

Com as coordenadas destes quatro pontos e através da relação de distância tridimensional entre eles, expressa pela Equação (5.9), calcularam-se as dimensões de três arestas do objeto de estudo.

$$D_{ij} = \sqrt{(X_i - X_j)^2 + (Y_i - Y_j)^2 + (Z_i - Z_j)^2} \quad (5.9)$$

onde:

D_{ij} – Distância entre pontos no espaço tridimensional;

X_i, Y_i, Z_i e X_j, Y_j, Z_j - Coordenadas dos pontos i e j na nuvem de pontos 3D.

Para verificar a confiabilidade das medidas obtidas com a metodologia proposta, compararam-se as medidas das arestas calculadas a partir dos pontos 3D com as dimensões de referência do objeto de estudo. As medidas de referência são ilustradas com o desenho da Figura 5.36.

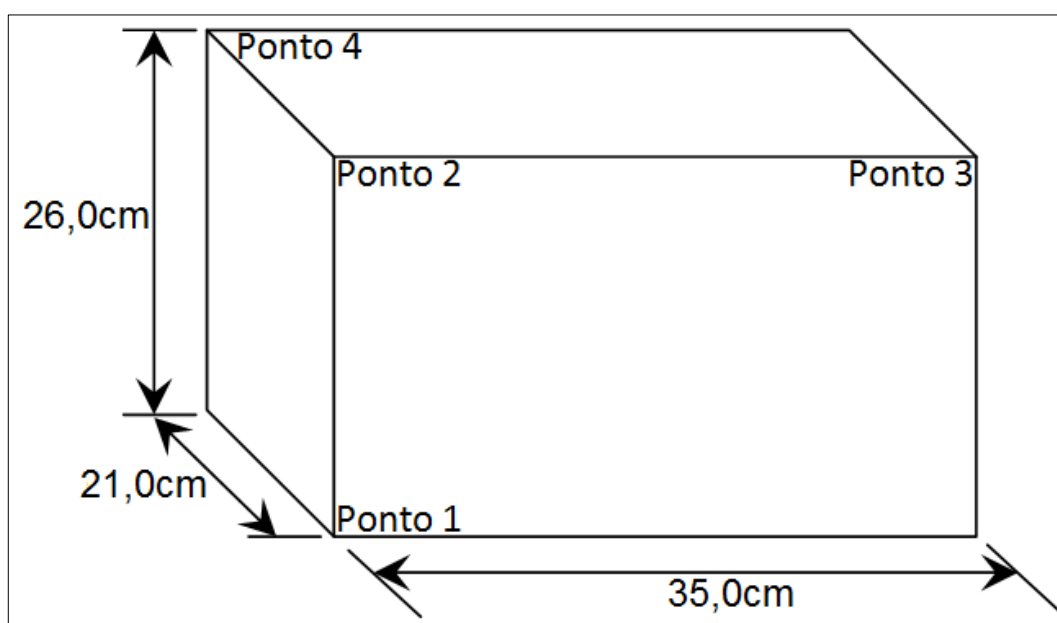


FIGURA 5.36 – Dimensões de referência do objeto de estudo

A partir das coordenadas tridimensionais dos quatro pontos ilustrados com a Figura 5.35, foi possível calcular as distâncias entre os pontos e compará-las com as medidas de referência. As diferenças obtidas são ilustradas com a Tabela 5.2.

Ponto	Coordenadas			Arestas	Medida realizada		Diferenças	
	X (cm)	Y (cm)	Z (cm)		Pontos 3D (cm)	Ref. (cm)	(cm)	(%)
1	-13,1	-13,6	-121,9	Pontos: 1-2	23,6	26,0	2,4	9,2
2	-8,0	6,1	-109,8	Pontos: 2-3	33,2	35,0	1,8	5,1
3	23,4	3,8	-120,3	Pontos: 2-4	26,3	21,0	5,3	25,2
4	-12,5	18,0	-132,8					

TABELA 5.2 – Coordenadas 3D dos pontos e medidas realizadas

O melhor resultado foi obtido para a medida realizada sobre a aresta entre os pontos 2-3, com diferença de aproximadamente 1,8 cm em relação à medida de referência, o que representa 5% da distância medida. O pior resultado foi obtido com o cálculo da aresta entre os pontos 2 e 4, com diferença de aproximadamente 5,3cm, que equivale 25% da medida de referência. Com este resultado conclui-se que os pontos projetados com maior profundidade na nuvem de pontos 3D apresentaram maior erro de posicionamento. Estes pontos descrevem uma superfície plana do objeto pouco aparente na imagem, encontra-se muito inclinada em relação ao plano da imagem, motivo pelo qual erros maiores podem ser esperados. Sobre os pontos 1, 2 e 3 da superfície frontal do objeto o erro foi menor, na ordem de 2 centímetros.

Conforme o Experimento 1 realizado para a análise de ruído, o melhor resultado foi obtido utilizando o filtro da mediana, que apresentou o desvio de 1,3cm para a distância de 1,3m medida utilizando tempo de integração de 2000 μ s. Este fato indica coerência com a diferença de 2cm encontrada com a medida da aresta frontal do objeto.

5.8 MODELAGEM DAS SUPERFÍCIES 3D

Para a modelagem tridimensional das superfícies segmentadas primeiramente foi analisada a melhor forma de processamento da imagem TOF. Verificou-se com o Experimento 4 que o crescimento de regiões utilizando o arquivo de intensidades da imagem TOF para escolha do ponto semente, e o arquivo de distâncias para a projeção ortogonal e crescimento de regiões a partir deste ponto não foi satisfatório. Isto porque o crescimento também ocorreu em superfícies que não pertenciam ao objeto analisado.

Melhores resultados foram obtidos com a metodologia de segmentação que utilizou a imagem com bordas evidenciadas. Esta foi gerada com a análise dos autovalores locais das superfícies a partir do arquivo de distâncias da imagem TOF, conforme Experimento 5. A partir desta segmentação, projetaram-se ortogonalmente os pontos das superfícies frontal e superior do objeto de estudo, gerando assim a nuvem de pontos 3D que é ilustrada com a Figura 5.37.

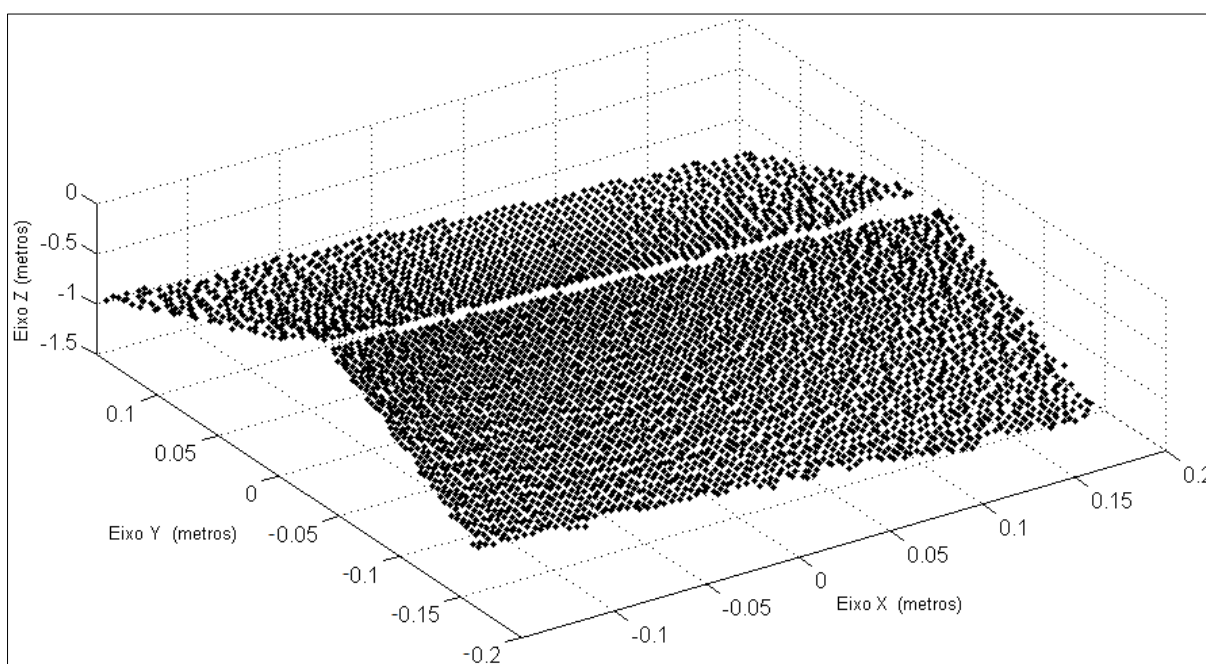


FIGURA 5.37 – Nuvem de pontos 3D das superfícies frontal e superior

A partir da nuvem de pontos 3D realizou-se a modelagem das superfícies frontal e superior do objeto, conforme é ilustrado com a Figura 5.38.

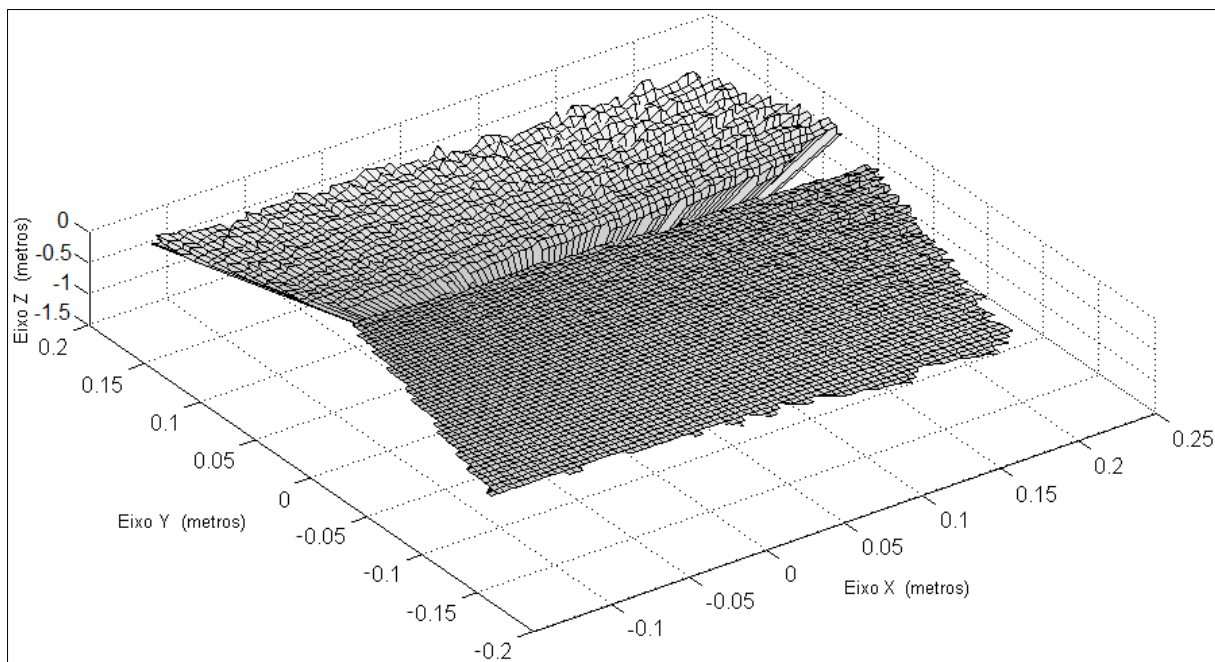


FIGURA 5.38 – Modelagem tridimensional das superfícies frontal e superior

Analisando a Figura 5.38 chegou-se a conclusão que a superfície frontal do objeto apresentou-se com padrão planar e uniforme. É a superfície que melhor refletiu o sinal para o sensor devido à sua posição em relação à câmara TOF. A superfície superior apresentou-se um pouco inclinada em relação ao plano da imagem e, com isto, maior rugosidade foi observada nesta superfície. Este fenômeno deve-se a menor captação do sinal refletido pela superfície do objeto pelo sensor da câmara.

6 CONCLUSÕES, RECOMENDAÇÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS

6.1 CONCLUSÕES

Neste trabalho descreveram-se conceitos introdutórios sobre as câmaras TOF. Avaliaram-se duas metodologias para a segmentação da nuvem de pontos 3D gerada a partir da imagem TOF. Apresentou-se uma aplicação para esta imagem na extração de informações métricas do objeto de estudo imageado a distância aproximada de 1,3m.

Para isto, foram abordados os seguintes assuntos: calibração da câmara para a obtenção de POI; correção geométrica da imagem TOF; filtragens para análise e tratamento de ruído; segmentação através do crescimento de regiões a partir de um ponto semente; segmentação do arquivo de distâncias da imagem TOF utilizando autovalores locais para a geração de uma imagem com bordas intensificadas; segmentação da imagem com bordas intensificadas através do algoritmo de deslocamento pela média; geração da nuvem de pontos 3D através da projeção ortogonal dos pontos da imagem de bordas segmentada; e por fim, a modelagem tridimensional de superfícies do objeto de estudo.

O processo de calibração da câmara foi realizado utilizando o método proposto por Zhang (2000) e possibilitou a determinação de POI. A correção geométrica das imagens foi feita através das coordenadas x_0 e y_0 do Ponto Principal, coeficientes de distorção Radial Simétrica de lentes K_1 e K_2 e distância focal calibrada f_c .

Com os Experimentos 1 e 2 foram realizadas filtragens para o tratamento de ruído das imagens TOF disponíveis. Nestes experimentos verificou-se que para a captação da imagem TOF à distância de 1,3m entre o objeto e a câmara, o tempo de integração de 2000 μ s foi o que gerou imagens com menor presença de ruído. Assim como o tempo de integração de 5000 μ s foi o mais adequado para captar imagens à distância de 2,1m. No entanto, chegou-se a conclusão que para a geração da nuvem de pontos 3D não se deveria utilizar filtragem nos dados, pois pequenas alterações no arquivo de distâncias da imagem TOF poderiam modificar o posicionamento tridimensional dos pontos, o que afetaria a qualidade das medidas realizadas com os pontos da nuvem 3D.

A primeira metodologia proposta para a segmentação da imagem TOF mostrou-se insatisfatória para a solução do problema. Empregou-se o crescimento de regiões a partir de pontos semente escolhidos no arquivo de intensidades desta imagem, projetando-os ortogonalmente para a nuvem de pontos 3D, utilizando os valores obtidos com o arquivo de distâncias da imagem TOF. Notou-se que erros no crescimento de regiões ocorreram devido à tolerância utilizada para a distância do ponto à superfície plana. Isto ocorreu porque a distância foi calculada ao longo do autovetor, que é ortogonal a superfície no ponto semente. Por este motivo, alguns pontos de superfícies adjacentes foram selecionados equivocadamente como pertencentes a uma mesma região na nuvem de pontos 3D, pois estavam dentro do limite fixado no critério de similaridade utilizado, mas na realidade não eram coplanares. Para resolver o problema com esta metodologia seria necessário estabelecer um limiar de crescimento lateral, não apenas de distância ortogonal a superfície plana semente. Este limiar poderia ser o valor digital do pixel, tendo em vista que superfícies coplanares apresentam uniformidade na resposta espectral. A rugosidade apresentada na superfície em que se realizava o crescimento da região também influenciou em erros na seleção de pontos, pois afetou no cálculo dos autovalores fazendo com que inclinações em relação a esta superfície fossem notadas.

A segunda metodologia analisada para a segmentação da imagem TOF mostrou-se satisfatória. A segmentação do arquivo de distâncias da imagem TOF foi realizada utilizando autovalores locais para a geração de uma imagem com bordas intensificadas, segmentação desta imagem com o algoritmo de deslocamento pela média e projeção destes segmentos para a nuvem de pontos 3D. A extração de informações métricas em arestas do objeto de estudo a partir dos pontos 3D apresentou diferença na ordem de 2cm com a medida de referência, sendo a imagem TOF adquirida com tempo de integração de 2000 μ s a uma distância aproximada de 1,3m entre o objeto de estudo e a câmara.

A Figura 6.1 ilustra as etapas de processamento a serem realizadas para a geração da nuvem de pontos 3D utilizando a segunda metodologia, considerada apropriada para a modelagem tridimensional de superfícies utilizando a imagem TOF. Esta é a metodologia proposta como conclusão do presente trabalho de pesquisa.

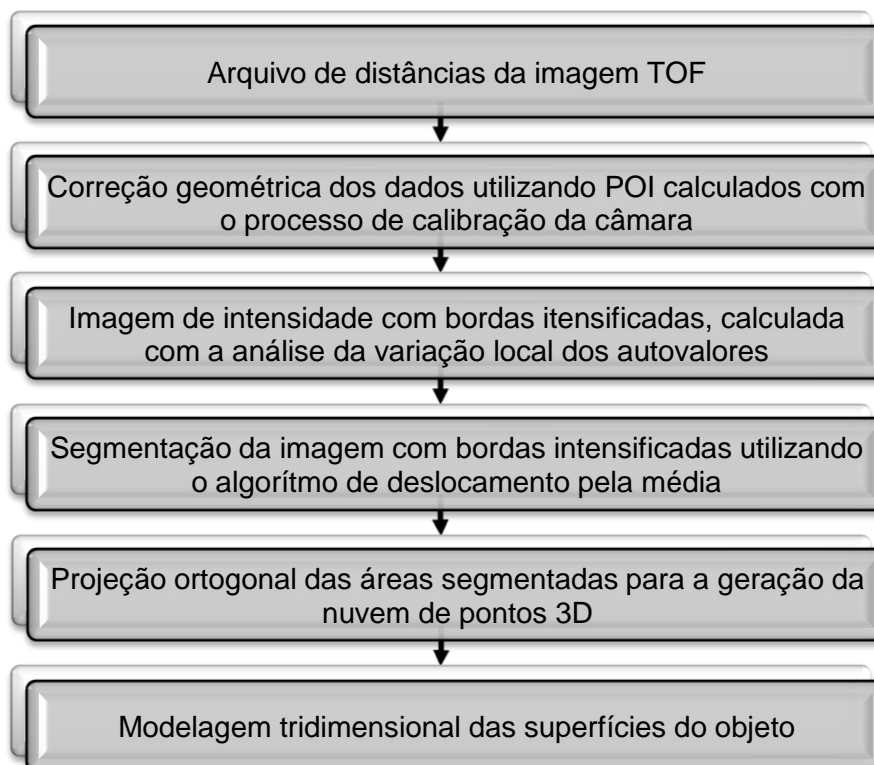


FIGURA 6.1 – Etapas da metodologia de processamento da imagem TOF

Foram encontradas medidas com maior qualidade quando a superfície do objeto estava paralela ao plano da imagem. Esta qualidade também foi afetada pela distância entre a câmara e o objeto, pela refletividade das superfícies e pela iluminação ambiente. Conforme o Experimento 6 realizado, a aresta frontal do objeto entre os pontos 2 e 3 apresentou a menor diferença de medida, 1,8cm que equivale a 5% da distância de referência.

Comparações para a diferença de medida encontrada podem ser realizadas com os seguintes trabalhos: Kahlmann *et al.* (2006) obtiveram exatidão de 1cm nas medidas, com o alvo à distância de 2,5m da câmara TOF utilizada; Wiedemann *et al.* (2008) obtiveram exatidão de 4cm, com o alvo medido a distância de 4m; May *et al.* (2008) obtiveram erro de 30cm para uma medida de 10,8m considerada como referência, com as imagens TOF captadas do centro de uma sala, girando a câmara 360°, e portanto envolviam também Parâmetros de Orientação Exterior da câmara; Kolb *et al.* (2009) obtiveram erro de 2cm para distâncias medidas de 1,0m à 4,5m. Nestes trabalhos foram realizadas correções geométricas nas imagens TOF com POI determinados com a calibração da câmara.

6.2 RECOMENDAÇÕES

Recomenda-se realizar a análise prévia do tempo de integração para a aquisição da imagem TOF com o objetivo de diminuir a presença de ruído. Este tempo deve ser escolhido de acordo com o ambiente em que será adquirida a imagem e também com as características de refletividade da superfície do objeto. Com este mesmo objetivo, e devido ao fato desta imagem ser obtida com iluminação LED no comprimento de onda infravermelho, recomenda-se analisar as influências da iluminação exterior ao sistema de iluminação da câmara.

De acordo com a aplicação a que se destina a imagem TOF, recomenda-se também realizar a calibração da câmara com método fotogramétrico convencional. Isto possibilitaria a melhora na correção geométrica da imagem, e conseqüente aumento na qualidade das medidas realizadas com os pontos da nuvem 3D. Correções radiométricas também podem ser aplicadas para melhorar a qualidade das medidas obtidas com a imagem TOF.

6.3 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Nuvens de pontos 3D geradas a partir de imagens TOF são ferramentas para a modelagem tridimensional das superfícies de objetos. Propiciam a obtenção de informações métricas destes objetos para distâncias de 0,3 a 7,0 metros, com erro centimétrico esperado.

Aplicações para as imagens TOF podem ser realizadas para a modelagem 3D de túneis, galerias, instalações industriais e fachadas de prédios com interesse de preservação como patrimônio histórico e cultural. Com a alta frequência de aquisição de imagens das câmaras TOF torna-se possível realizar filmagens e mapeamentos em movimento.

Outras aplicações possíveis para as imagens TOF estão na sua utilização para a criação de cenários 3D em jogos eletrônicos, aquisição de filmes com tecnologia 3D, modelagem tridimensional de obras de arte, Biometria e análise de movimentos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANDRADE, J. B. **Fotogrametria**. 2. ed. Curitiba: SBEE, 1998. 274 p.

APUZZO, N. D'. **Recent advances in 3D full body scanning with applications to fashion and apparel**. 10p. In: Proceedings, Optical 3-D Measurement Techniques IX, Vienna, Austria, 2009.

BALTSAVIAS, E. P. **Airborne laser scanning: basic relations and formulas**. ISPRS - Journal of Photogrammetry & Remote Sensing, v. 54, p. 199-214, 1999.

BAZAN, W. S.; TOMMASELLI, A. M. G; GALO, M.; RUY, R. S. **A influência das injunções de orientação relativa na calibração de um sistema dual de câmaras digitais**. 23p. Boletim de Ciências Geodésicas, v. 15, n. 3. Curitiba, 2009.

BELTON, D. **Improving and extending the information on Principal Component Analysis for local neighborhoods in 3D points clouds**. 8p. The international Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. v. XXXVII, B5. Beijing, 2008.

BELTON, D.; LICHTI, D. **Classification and segmentation of terrestrial laser scanner point clouds using local variance information**. 6p. In: Proceedings, ISPRS Commission V Symposium 'Image Engineering and Vision Metrology', 2006.

BROWN, D. C. **Close-Range Camera Calibration**. Photogrammetric Engineering, v. 37, nº 8, p. 855-866, 1971.

CENTENO, J. A. S. **Sensoriamento Remoto e Processamento de Imagens Digitais**. Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas. Curitiba: UFPR, 2004. 209p.

CENTENO, J. A. S.; JUTZI, B. **Evaluation of range imaging sensor concerning resolution and illumination**. 6p. In: Proceedings, The 2010 Canadian Geomatics Conference and Symposium of Commission I, ISPRS. Calgary, Alberta, 2010.

CHRISTOUDIAS, M. C.; GEORGESCU, B.; MEER, P. **Synergism in Low Level Vision**. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, v. 24, n. 5, p. 603-619, 2002.

COMANICIU, D.; MEER, P. **Mean Shift: A Robust Approach Toward Feature Space Analysis**. 17p. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, v. 24, n. 5,. p. 603-619, 2002.

FUCHS, S.; HIRZINGER, G. **Extrinsic and depth calibration of ToF cameras**. In: Proceedings, IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), Anchorage, USA, 2008.

FUCHS, S.; MAY, S. **Calibration and registration for precise surface reconstruction with ToF cameras**. In: Proceedings of the Dynamic 3D Imaging Workshop in Conjunction with DAGM (Dyn3D), v. I, Heidelberg, Germany, 2007.

GEMAEL, C. **Introdução ao ajustamento de observações: aplicações geodésicas**. 3 ed. Curitiba: UFPR, 1994. 319p.

GONZALEZ, R. C.; WOODS, R. E. **Processamento de imagens digitais**. São Paulo: Edgard Blücher Ltda., 2000. 509p.

GROSS, H.; THOENNESSEN, U. **Extraction of lines from laser point clouds**. p. 86-91. In: Proceedings, Symposium of ISPRS Commission III: Photogrammetric Computer Vision PCV06. Eds.: Förstner, W.; Steffen, R. International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences 36 (Part 3), 2006.

HABIB, A.; MORGAN, M. **Automatic calibration of low-cost digital cameras**. p. 948-955. Journal of Photogrammetric Record, 2003.

JAMTSO, S. **Geometric modelling of 3D Range Cameras and their application for structural deformation measurement**. 174p. (Master's Thesis, Department of Geomatics Engineering). University of Calgary, Alberta, 2010.

JOHNSON, R. A.; WICHERN, D. W. **Applied multivariate statistical analysis**. 4. ed. New Jersey: Pearson Prentice Hall, 1998.

JUTZI, B.; GROSS, H. **Nearest neighbor classification on laser point clouds to gain object structures from buildings**. 6p. In: Proceedings, ISPRS Hannover Workshop, 2009: High-Resolution Earth Imaging for Geospatial Information. Disponível em: <http://www.isprs.org/proceedings/XXXVIII/1_4_7-W5/paper/papers.htm> Acesso: 16/11/2010

KAHLMANN, T.; REMONDINO, F.; INGENSAND, H. **Calibration for increased accuracy of the range imaging camera Swissranger™**. ISPRS Commission V Symposium 'Image Engineering and Vision Metrology', v. XXXVI, n. 5, 2006.

KEMENY, S. E.; EL-SAYED, E.; MENDIS, S.; FOSSUM, E. R. **Update on focal-plane image processing research**. 8p. SPIE v. 1447, Charged-Coupled Devices and Solid Optical Sensors II, 1991.

KHONGSAB, P. **Signal processing and performance evaluation of a PMD camera for space docking**. 88p. (Master's Thesis, Continuation Courses, Space Science and Technology, Department of Space Science). Lulea University of Technology, Kiruna, 2009.

KOCH, R.; SCHILLER, I.; BARTCZAK, B.; KELLNER, F.; KÖSER, K. **MixIn3D: 3D mixed reality with ToF camera**. 16p. In: Work Programme of the EU's 7th, Framework program, 2009.

KOLB, A.; BARTH, E.; KOCH, R.; LARSEN, R. **Time-of-Flight sensors in Computer Graphics**. 16p. In: STAR – State of The Art Report. The Eurographics Association, 2009.

LANGE, R. **3D Time-of-Flight distance measurement with custom solid-state image sensors in CMOS/CCD-technology**. 205 p. (Dissertation, Department of Electrical Engineering and Computer Science at University of Siegen for the degree of Doctor of Technical Sciences). University of Siegen, Alemanha, 2000.

LEON, S. J. **Linear Algebra with applications**. 4. ed. Dartmouth: Prentice Hall, 1998. 390p.

LUAN, X. **Experimental investigation of Photonic Mixer Device and development of TOF 3D ranging systems based on PMD technology**. A dissertation submitted to the Department of Electrical Engineering and Computer Science at University of Siegen. Siegen, 2001.

MACHADO, A. M. L. **Extração automática de contornos de edificações utilizando imagem gerada por câmara digital de pequeno formato e dados LIDAR**. 201 p. Tese apresentada ao Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas da Universidade Federal do Paraná. Curitiba: UFPR, 2006.

MASS, H. G.; VOSSelman. **Two algorithms for extracting building models from raw laser altimetry data**. 11p. Elsevier Science: Photogrammetry & Remote Sensing, 1999.

MAY, S.; DROESCHEL, D.; HOLTZ, D.; WIESEN, C. FUCHS, S. **3D Pose estimation and mapping with time-of-flight cameras**. 6p. Germany, 2008. Disponível em: http://www.robotic.de/fileadmin/robotic/fuchs/iros08_3dcam.pdf. Acesso em: 25/10/ 2010.

MITISHITA, E. A. **Monorestituição digital de aerofotos, associada com sistema de computação gráfica C.A.D., para fins de mapeamento na área florestal**. 251p. Tese (Doutorado em Engenharia Florestal) – Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná, 1997.

MÖLLER, T.; KRAFT, H.; FREY, J.; ALBRECHT, M.; LANGE, R. **Robust 3D measurement with PMD sensors**. 2005.

PAULY, M.; GROSS, M.; KOBELT, L. P. **Efficient simplification of point-sampled surfaces**. 8p. In: VIS '02: Proceedings of the Conference on Visualization '02, Washington, DC, USA, 2002. IEEE Computer Society.

PECHT, Y.; FOSSUM, E. R. **Wide intrascene dynamic range CMOS APS using dual sampling**. IEEE Transactions on Electron Devices, v. 44, n. 10, 1997.

PMD Technologies. **PMD [vison][®] CamCube 2.0**. 4p. Datasheet n. 20090601. Siegen, 2009. Disponível em: <http://www.pmdtec.com/products-services/pmdvisionr-cameras/pmdvisionr-camcube-20/>>. Acesso em: 01/03/ 2010.

PMD Technologies. **PMD [vison][®] CamCube 2.0**. Software development tutorial. 13p. Siegen, 2009. Disponível em: http://www.pmdtec.com/fileadmin/pmdtec/downloads/documentation/camcube_softwaredevelopmenttutorial.pdf>. Acesso em: 15/04/ 2010.

RAPP, H. **Experimental and theoretical investigation of correlating TOF-camera systems**. 71p. Diploma Thesis in Physics, Faculty for Physics and Astronomy. University of Heidelberg, Alemanha, 2007.

RINGBECK, T. **A 3D Time Of Flight camera for object detection**. 10p. In: Proceedings, Optical 3D Measurement Techniques, Plenary Session 1: Range Imaging I. Zürich, 2007.

SHAKARJI, C. M. **Least-Squares fitting algorithms of the NIST algorithm testing system**. 9p. Journal of research of the national of standards and technology, v. 103, n. 6, 1998.

THEUWISSEN, A. **Solid-state imaging with Charge-Coupled Devices**. PP. 34-46. Kluwer Academic Publishers, 1995. Disponível em: <www.springerlink.com>. Acesso em: 08/07/2010.

WIEDEMANN, M.; SAUER, M.; DRIEWER, F.; SCHILLING, K. **Analysis and characterization of the PMD camera for application in mobile robotics**. 6p. In: Proceedings of the 17th World Congress, The International Federation of Automatic Control. Seoul, Korea, July 6-11, 2008.

ZHANG, Z. **A flexible new technique for camera calibration**. 5p. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, November, 2000.