

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA
MESTRADO EM ENGENHARIA MECÂNICA

MARCOS HIROSHI TAKAHAMA

**AVALIAÇÃO DO ESPECTRO DE FREQUÊNCIA DE MEDIDAS DE CORRELAÇÃO
DE IMAGEM DIGITAL TRIDIMENSIONAL UTILIZANDO CÂMERAS DE BAIXO
CUSTO**

DISSERTAÇÃO

CORNÉLIO PROCÓPIO
2019

MARCOS HIROSHI TAKAHAMA

**AVALIAÇÃO DO ESPECTRO DE FREQUÊNCIA DE MEDIDAS DE CORRELAÇÃO
DE IMAGEM DIGITAL TRIDIMENSIONAL UTILIZANDO CÂMERAS DE BAIXO
CUSTO**

Dissertação apresentada como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica, do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná - Câmpus Cornélio Procópio.

Orientador: Prof. Dr. Adailton Silva Borges

CORNÉLIO PROCÓPIO
2019

A todos aqueles que trilham estes mesmos passos
em busca de seus objetivos.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus por ter me guiado até aqui e a imagem de Nossa Senhora da Conceição pela companhia e proteção.

Ao meu orientador Prof. Dr. Adailton Silva Borges imensamente pela orientação, amizade, dedicação, paciência e incentivo para o desenvolvimento deste trabalho.

Ao Prof. Dr. Adriano Silva Borges, que junto ao Adailton, mostraram os passos de um profissional de excelência e por acreditarem no potencial das pessoas, fizeram desta experiência um aprendizado para vida.

Aos antecessores que desenvolveram as bases deste trabalho e pelo trabalho em conjunto: Henrique Rissá, Jomar Berton, Danilo Montilha.

Aos funcionários da universidade que de alguma forma colaboraram para a realização desta pesquisa e que estiveram sempre dispostos nas horas de dificuldade através do companheirismo, em especial: Malaca, José Eduardo, Celso Barba e Conrado.

Aos companheiros de pesquisa do Laboratório Tecnológico de Vibrações e Manutenção Mecânica, pela parceria, desenvolvimento de conhecimento, risadas e pelo café moderadamente forte de todos os dias: Fernando Tanaka, Rodrigo Baptista, Thaís, Heytor, Marcos Truiz, Superman, Ubatuba, Conan, aos companheiros da iniciação científica: Gustavo, Victoria, Vitão, Antônio, Gustavo, Vinicius, Vitória. Sem esquecer também dos funcionários responsáveis por manter o laboratório sempre agradável, limpo e organizado, Cida da Limpeza, Paulinho da manutenção e Sueli do café.

A minha família pelo apoio financeiro e incentivo para realização de mais esta etapa da minha bem-sucedida formação.

A minha namorada Cintya, pela paciência e pelos dias que me ausentei a lhe fazer companhia.

Aos amigos da República Berto pela união em manter o teto de nossa moradia em pé mesmo durante “as fortes tempestades”.

A CAPES e a Fundação Araucária, instituições patrocinadoras que me concederam bolsa durante parte do tempo para o desenvolvimento do trabalho e conclusão do Mestrado.

RESUMO

TAKAHAMA, Marcos Hiroshi. **Avaliação do espectro de frequência de medidas de correlação de imagem digital tridimensional utilizando câmeras de baixo custo.** 2019. 91 f. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Cornélio Procópio, 2019.

O presente trabalho expõe uma metodologia para obter o espectro de frequência de deslocamentos dinâmicos utilizando processamento e correlação de imagens. O procedimento experimental utiliza um sistema de aquisição de imagem composto por um par de webcams e um computador, popularmente comercializados e de baixo custo. Este sistema permite a digitalização de uma cena (domínio analógico para digital) e permite o cálculo de posição do objeto por meio de correlação de imagens (pós-processamento) através dos parâmetros intrínsecos do par de webcams determinados previamente (calibração). Os testes apresentados possuem o objetivo de demonstrar a validade da metodologia desenvolvida medindo a aceleração de um alvo deslocado por atuador eletromecânico controlado por uma fonte geradora de sinal. Os resultados apresentados utilizando deste método são confrontados com a obtenção de medidas utilizando o sistema de aquisição convencional (placa de aquisição e acelerômetro). A técnica proposta foi submetida a análises em dois experimentos; no primeiro foi analisado a quantidade de fotos necessárias para caracterização das propriedades do par de câmeras e no segundo experimento foi realizada a análise da eficiência da técnica empregada variando a frequência do deslocamento controlado para fins de comparação dos dados adquiridos com a técnica clássica.

Palavras-chave: Aquisição de dados. Processamento de imagens. Câmera digital.

ABSTRACT

TAKAHAMA, Marcos Hiroshi. **Evaluation of the frequency spectrum of three-dimensional digital image correlation measurements using low cost cameras.** 2019. 91 f. Dissertation (Master degree) - Post-Graduation Program in Mechanical Engineering, Federal Technological University of Paraná. Cornélio Procópio, 2019.

This work presents a methodology to obtain the frequency spectrum of the dynamic displacements using image processing and correlation. The experimental procedure uses an image acquisition comprised of a pair of webcams and a computer, both easily procured and of low cost. This system allows the digitization of a scene (from analog to digital domain) and allows the computing of the object's position by image correlation (post-processing) through the intrinsic parameters of the pair of cameras previously determined (calibration). The aforementioned tests aim to demonstrate the validity of the developed methodology by measuring the acceleration of a target displaced by an electromechanical actuator controlled by a signal generator. The results using this method are compared to set of measurements obtained using a conventional acquisition system (acquisition system and accelerometer). The proposed technique was subjected to analysis in two experiments; in the first the quantity of necessary pictures to characterize the pair of cameras was analyzed and in the second the analysis was of the efficiency of the technique employed by varying the frequency of the displacement for the purpose of comparing the acquired data with the conventional technique.

Keywords: Data acquisition. Image processing. Digital camera.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Diagrama com as etapas para o processamento das imagens.	19
Figura 2– Interface gráfica VODCA do algoritmo.	21
Figura 3 – Componentes de iluminância Il e refletância Ref em infinitos pontos localizados nas faces de um cubo.....	22
Figura 4– Discretização de uma imagem observada.	24
Figura 5 – Intensidade luminosa no par de eixos de uma imagem.	25
Figura 6 – Ilustração da montagem do sistema de aquisição de imagens.	26
Figura 7 – Componentes de uma câmera digital.....	27
Figura 8 – (a) Localização do obturador e (b) aumento da passagem de luz com o aumento da abertura do obturador.....	28
Figura 9 - (a) Velocidade do obturador de 1/15, (b) velocidade do obturador de 1/60, (c) velocidade do obturador de 1/1000.....	29
Figura 10 – Estrutura convencional de um sensor CCD.	30
Figura 11 – Estrutura convencional de um sensor CMOS.	31
Figura 12 – Escala de resolução de uma foto em (a) 1250 DPI, (b) 300 DPI, (c) 150 DPI e (d) 72 DPI.....	32
Figura 13 – Aquisição de imagens utilizando Webcam.	33
Figura 14– Linha temporal de execução do loop de aquisição.....	34
Figura 15 – Composição de cores na forma matricial.	35
Figura 16 - Identificação dos alvos no padrão do tipo de tabuleiro (a) na câmera 1 e (b) na câmera 2	38
Figura 17- Identificação de diferentes posições do tabuleiro.....	39
Figura 18 – Processo de distorção de imagem em uma lente.....	42
Figura 19 – Imperfeições de imagem, (a) descentralização do eixo mecânico, (b) efeito barril e almofada e (c) distorção radial.....	43
Figura 20 – Princípio para determinação da distância focal da câmera.	43
Figura 21 - Ajuste do centro da imagem no centro óptico da lente.	44
Figura 22 – Modelo “pinhole”.....	45
Figura 23 – Ângulos formados nos eixos X, Y e Z	46
Figura 24 – Correlação da Posição dos centroides em cada frame	47
Figura 25 - Coordenadas u, v do par de planos para o espaço X, Y, Z	48

Figura 26 - Distorção de Lentes da Webcam Logitech C920 (a) Radial e (b) Tangencial.....	50
Figura 27 – (a) Imagem colorida, (b) separação da imagem das rosas e (c) identificação da pessoa (c).....	51
Figura 28 – Seleção de uma intensidade de cor nos canais R, G e B.	52
Figura 29 – Imagem colorida (a) e aplicação de filtro de cor através da seleção de intensidade de cor R (b), G (c) e B (d) de interesse.	53
Figura 30 – Imagem original (a), aplicação de limiarização para separação de um objeto (b), aplicação do filtro de remoção para pequenos objetos (c).	54
Figura 31 – Determinação da organização dos alvos	55
Figura 32 – Correlação da Posição dos centroides em cada frame	56
Figura 33 – Confronto de resultados entre a metodologia e a técnica clássica.	58
Figura 34 – (a) Representação da montagem do sistema de aquisição de imagem e (b) Montagem experimental do sistema de aquisição	60
Figura 35 – Posicionamento do padrão em forma de tabuleiro (a), algumas amostras da sucessão de fotos do padrão obtidas pelo par de webcams (b), nuvens dos pontos identificados (c) e erros de reprojeção calculado pela toolbox (d).....	61
Figura 36 – (a) Representação da montagem do Shaker e (b) Montagem experimental.....	62
Figura 37 – Execução experimental em: (a) Vista Frontal e (b) Detalhe do posicionamento do acelerômetro e do alvo	63
Figura 38 – Tratamento de imagens Captura do deslocamento (a) na haste na câmera esquerda e (b) aplicação do filtro de cor.	64
Figura 39 – Posicionamento do padrão no processo de calibração com (a) 10 fotos, (b) 25 fotos, (c) 50 fotos, (d) 100 fotos e (e) 200 fotos.	67
Figura 40 – Deslocamento do alvo no eixo X (a), deslocamento do alvo no eixo Y (b) e deslocamento no eixo Z (c) calculados a partir da calibração de 100 fotos.	68
Figura 41 – Aceleração do alvo percebido pelo algoritmo com calibração de (a) 10 fotos, (b) 21 fotos, (c) 37 fotos, (d) 55 fotos e (e) 177 fotos.	70
Figura 42– Espectro de frequência do alvo com (a) 10 foto, (b) 25 fotos,(c) 50 fotos, (d) 100 fotos e (e) 200 fotos.	73
Figura 43 – “Frequências fantasma” na calibração com 100 amostras	77
Figura 44 – Reamostragem “spline” para movimento da haste do Shaker em 4Hz. .78	
Figura 45 – Espectro de frequência do alvo do Experimento 2.....	79

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Exemplo de valores para I_x, y, z [em lux ou lúmen/m ²] e para R_x, y, z	23
Quadro 2 – Tamanho em megabytes de sucessão de imagens em escala RGB.	36
Quadro 3 – Especificações de Hardware do sistema de aquisição de imagens experimental.....	59
Quadro 4 – Quantidade de fotos utilizadas para caracterização das câmeras.	66
Quadro 5 – Resultados do experimento.....	76
Quadro 6 – Resultado da mudança de frequência no deslocamento do Shaker.	80
Quadro 6- – Parâmetros Obtidos no experimento 1 para 10 fotos	87
Quadro 7 – Parâmetros Obtidos no experimento 1 para 25 fotos	88
Quadro 8 – Parâmetros Obtidos no experimento 1 para 50 fotos	89
Quadro 9 – Parâmetros Obtidos no experimento 1 para 100 fotos	90
Quadro 10 – Parâmetros Obtidos no experimento 1 para 200 fotos	91

LISTA DE SIGLAS

3D-DIC	3D – Digital Image Correlation
LTVM	Laboratório Tecnológico de Vibrações Mecânicas e Manutenção
SLR	Single Lens Reflex
DPI	Dots Per Inch
MB	Megabytes

LISTA DE ACRÔNIMOS

VODCA	<i>Visual Object Detector by Computational Analysis</i>
FORTRAN	Formula Translation
CCD	Charge coupled device
CMOS	Complementary metal-oxide-semiconductor
APS	Active pixel sensor

LISTA DE SÍMBOLOS

A	Sistema de equação de Hartley e Zisserman (2003) para realizar a triangulação da perspectiva de imagens em um ponto no espaço
B, S	Matrizes ortonomais
C	Correção de Lentes
Ch	Canal
C_r	Correção da distorção radial em lentes
C_t	Correção da distorção tangencial em lentes
du, dv	Discretização do tamanho do pixel na escala da resolução da imagem formada nos eixos u, v respectivamente
d	Matriz diagonal na forma de fator de escala
D	Diâmetro do Obturador
Ds	Discretização
E	Passagem luminosa no obturador
\hat{E}	Matriz nula de minimização do erro (usado para encontrar a matriz F)
F	Matriz Fundamental
\vec{F}	Reflexão de luz
h	Distância da face de uma lente até um objeto observado
H	Relação de transferência de um plano não paralelo
h_F	Componentes da matriz Fundamental
h_{fs}	Distância focal
ΔF	Discretização no domínio da frequência
i, j	Quantidade árbitraia de iterações (imagens, quadros, métodos de busca)
\vec{l}_l	Iluminância
$limiar$	Função Tresholding para filtro de cores
L	Eixo mecânico real
M	Matriz intrínseca
N	Velocidade de abertura do obturador
O	Origem do sistema de coordenadas
p	Ponto definido em um plano
p'	Ponto projetado na lente com distorções
P	Ponto conhecido no eixo de coordendas espaciais (X, Y, Z)
\hat{P}	Ponto reprojetado no eixo de coordendas espaciais (X, Y, Z)
R	Matriz de rotação
Ref	Refletância

t	Tempo
T	Vetor de Translação
\mathcal{T}	Tratamento de posição de um sinal
u, v	Eixos de coordenadas do plano da imagem formada sem distorção
u', v'	Eixos de coordeandos do plano da imagem formada com distorção
\bar{x}	Cor amostral
α	Ângulo de abertura da lente
α, β e γ	Rotação em torno dos eixos X, Y, Z respectivamente, pela regra da mão esquerda
δ	Distância do alvo calculado em relação a outros alvos, ou o mesmo alvo em outro quadro
ε	Erro de Reprojeção
π	Plano de observação de uma imagem
θ	Tom de cor em um canal de cores
σ	Desvio padrão

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	15
2 OBJETIVO.....	18
2.1 Objetivos específicos	18
3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	19
3.1 Sistema de aquisição de imagens digitais	22
3.1.1 Componentes da câmera digital	26
3.1.1.1 Lentes e distância focal	28
3.1.1.2 Exposição e tipos de sensores	28
3.1.1.3 Resolução de imagem e discretização espacial	31
3.1.2 Marca temporal.....	32
3.1.3 Escala de cor e armazenamento digital.....	34
3.2 Caracterização do par de câmeras.....	37
3.2.1 Leitura de frames do padrão geométrico	37
3.2.2 Parâmetros estimados.....	39
3.2.2.1 Parâmetros intrínsecos	41
3.2.2.2 Parâmetros extrínsecos	45
3.3 Pós processamento de imagem	47
3.3.1 Correção da distorção de lentes	49
3.3.2 Separação dos alvos do restante da imagem.....	51
3.3.3 Filtro de ruído para pequenos objetos	53
3.3.4 Identificação e organização dos centróides de cada alvo.....	54
3.3.5 Correlação de imagem	55
3.3.6 Reamostragem do sinal obtido	57
4 PROCEDIMENTO METODOLÓGICO	58
5 RESULTADOS	65
5.1 Experimento 1 – variação de quantidade de fotos para caracterização do par de câmeras.....	65
5.2 Experimento 2 - variação da frequência do sinal.....	78
6 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	81
7 REFERÊNCIAS	83
APÊNDICE - CARACTERIZAÇÃO DE CÂMERAS DO EXPERIMENTO 1	87

1 INTRODUÇÃO

Métodos de monitoramento capazes de determinar o comportamento dinâmico de sistemas mecânicos são ferramentais de alta importância nas áreas de engenharias, pois é requisito para a avaliação do estado adequado de conservação de máquinas e equipamentos em uma busca constante por alta produtividade, capacidade de produção, desempenho, e baixo custo de manutenção (BORGES, 2006). Neste cenário, visando consolidar a prevenção de falhas neste desdobramento pela busca por qualidade no estado de funcionamento de sistemas submetidos a esforços dinâmicos (carregamentos que variam com o tempo), desenvolve-se a otimização de técnicas de medição clássicas, ao mesmo tempo que surgem técnicas de medição alternativas.

Segundo Reynolds e Pavic (2000) o método clássico para validação do estudo das propriedades dinâmicas de sistemas físicos é realizado através de análise modal experimental, tradicionalmente efetuado com a aplicação de uma carga dinâmica conhecida no sistema, no qual pode-se apresentar como impulsiva através de um martelo instrumentado de impacto (martelo contendo uma célula de carga) ou contínua através de um atuador eletromecânico (também conhecido como *Shaker*). O comportamento estrutural submetido à fonte de excitação é analisado por meio de extração de informações de gráficos de resposta do sistema no domínio da frequência obtidas por meio de sensores do tipo acelerômetro posicionados ao longo da estrutura em estudo.

Sensores a laser e câmeras são métodos alternativos como meio de obtenção da resposta do sistema e por consequência, também podem ser empregados tanto para o estudo de validação quanto de monitoramento. Cada um destes sensores possui vantagens e desvantagens em relação ao tipo de análise que se deseja realizar ou tipo estrutura, conforme citado no trabalho de Helfrick et al. (2011) onde a diferença entre os tipos de sensores é exposta em uma análise comparativa apresentada resumidamente nos próximos parágrafos.

O uso de acelerômetros oferece como vantagem, fácil obtenção de funções de transferência (FRFs), possibilidade de estudo de grandes bandas de frequência para análise de modos de vibrar e baixo custo quando a análise da resposta estrutural requer poucos pontos para avaliação. Entre as desvantagens que o autor cita, devem ser considerados: elevado custo de tempo para posicionamento no monitoramento de

grandes áreas (relacionado ao número de acelerômetros empregados), requer contato com a superfície medida e, portanto, deve ser considerado a inserção da massa do sensor no estudo estrutural.

Em relação aos sensores a laser entre as principais vantagens podemos citar: fácil obtenção de funções transferência, possibilidade de estudo de grandes bandas de frequência, capacidade de análise de vários pontos utilizando o mesmo equipamento e ser um sensor que não necessita de contato e, portanto, não há inserção de massa no sistema. Contudo não oferece uma opção financeiramente acessível e a superfície de análise é limitada ao campo de visão deste equipamento.

O uso de câmeras como sensor é alvo de grande interesse na área de pesquisa devido ao potencial de evolução de suas características construtivas resultante da competitividade de venda comercial que deve torná-lo atrativo para uso doméstico, reduzindo preço e aumentando qualidade de obtenção de imagens em resolução, velocidade de captura e armazenamento. Tais características favorecem aplicação na análise do comportamento dinâmico de sistemas mecânicos, pois pode oferecer condições para aquisição de dados com resolução espacial e temporal cada vez melhores, considerando um aumento de desenvolvimento tecnológico progressivo. Comparado aos demais sensores, se destaca por não requerer contato físico com a estrutura em análise e permitir obter o resultado de vários pontos estruturais simultaneamente em uma única análise.

Estudos envolvendo medidas de posição e deslocamento relacionados ao último tipo de sensor citado, surgiram com maior frequência em publicações a partir do início deste século, sendo tema central de estudo nos trabalhos desenvolvidos por: Lobão (2004), Boltryk et al. (2008), Sutton et al. (2008), Ji, Yang e Chen (2008), Hsu et al. (2009), Marques (2011) e Xu et al. (2011) com a utilização de câmeras como sensor de posição. Alguns anos depois, trabalhos como de Shang et al. (2014), Kumari, Banik e Premi (2015) e Park et al. (2015) evidenciam a possibilidade de realizar o monitoramento constante de deformação de um objeto por meio de câmeras relacionando medidas de posição em relação ao tempo (deslocamento dinâmico).

A investigação científica demonstrada em trabalhos recentes como de Helfrick et al. (2011), Kim (2014), Chen et al. (2014), Bartilson, Wieghaus e Hurlebaus (2015), Reu, Rohe e Jacobs (2017), Gwashavanhu, Oberholster e Heyns (2016) e Yu e Pan (2017) demonstram o progresso de obtenção de medidas de deslocamento dinâmico, com a realização de análise de vibrações e análise modal experimental

utilizando câmeras e, portanto, é foco de maior interesse na atualidade. Em todos os trabalhos citados com aplicação em análise modal também é evidenciado pelos autores que a maior vantagem de mensurar grandezas físicas com este tipo de sensor, e não haver contato físico com a estrutura permitindo a não alteração das propriedades do sistema medido.

A utilização de câmeras como sensores em conjunto com o processamento de imagens para obtenção de resultados é capaz de oferecer um método alternativo de medição de deslocamento discreto tridimensional muito eficiente aplicado ao estudo de análise modal experimental. Apontado no trabalho de Beberniss e Ehrhardt (2017), resultados entre sensores a laser e o uso de câmeras se assemelham quando utilizado a técnica e equipamentos adequados.

A nomenclatura para a determinação da posição de pontos em deslocamento de uma estrutura no espaço tridimensional, a partir da perspectiva de um par ou mais de imagens de câmeras sincronizadas com áreas de visão diferentes, é denominada correlação de imagem digital em 3 dimensões (*Digital Image Correlation – 3D DIC*) conforme descrito em diversos trabalhos como de Yu e Pan (2017), XUE et al. (2017) e Beberniss e Ehrhardt (2017). A principal dificuldade neste método segundo Berton Junior (2016) está em garantir que a posição do objeto em movimento seja registrada no mesmo instante de tempo, quando utilizada mais de uma câmera.

Com a finalidade de avaliar a metodologia 3D-DIC com equipamentos de custo acessível, este trabalho propõe a apresentação de um meio de obtenção de medidas de deslocamento dinâmico, a partir de imagens digitais obtidas por meio da montagem de um sistema de aquisição de imagens, composto por um par de webcams e um computador, onde rotinas numericamente implementadas controlam a aquisição de imagens de maneira sincronizada e extraí informações das imagens em ambiente MATLAB através de um algoritmo.

A validação desta metodologia é realizada através da avaliação do espectro de frequência do deslocamento da ponta da haste de um *Shaker* comparando os resultados obtidos pela presente metodologia e os resultados da medição utilizando o método convencional composto por um sistema de aquisição e acelerômetro, vendidos comercialmente. A utilização da metodologia apresentada trata-se de uma opção alternativa de medição em análise de vibração para baixas frequências e tem como característica principal o baixo custo e acessibilidade para empregá-la.

2 OBJETIVO

O objetivo geral do presente trabalho é desenvolver, implementar e avaliar, através da técnica de correlação de imagem digital tridimensional (3D-DIC), uma metodologia para obtenção do espectro de frequência do deslocamento de um objeto em movimento periódico previamente determinado.

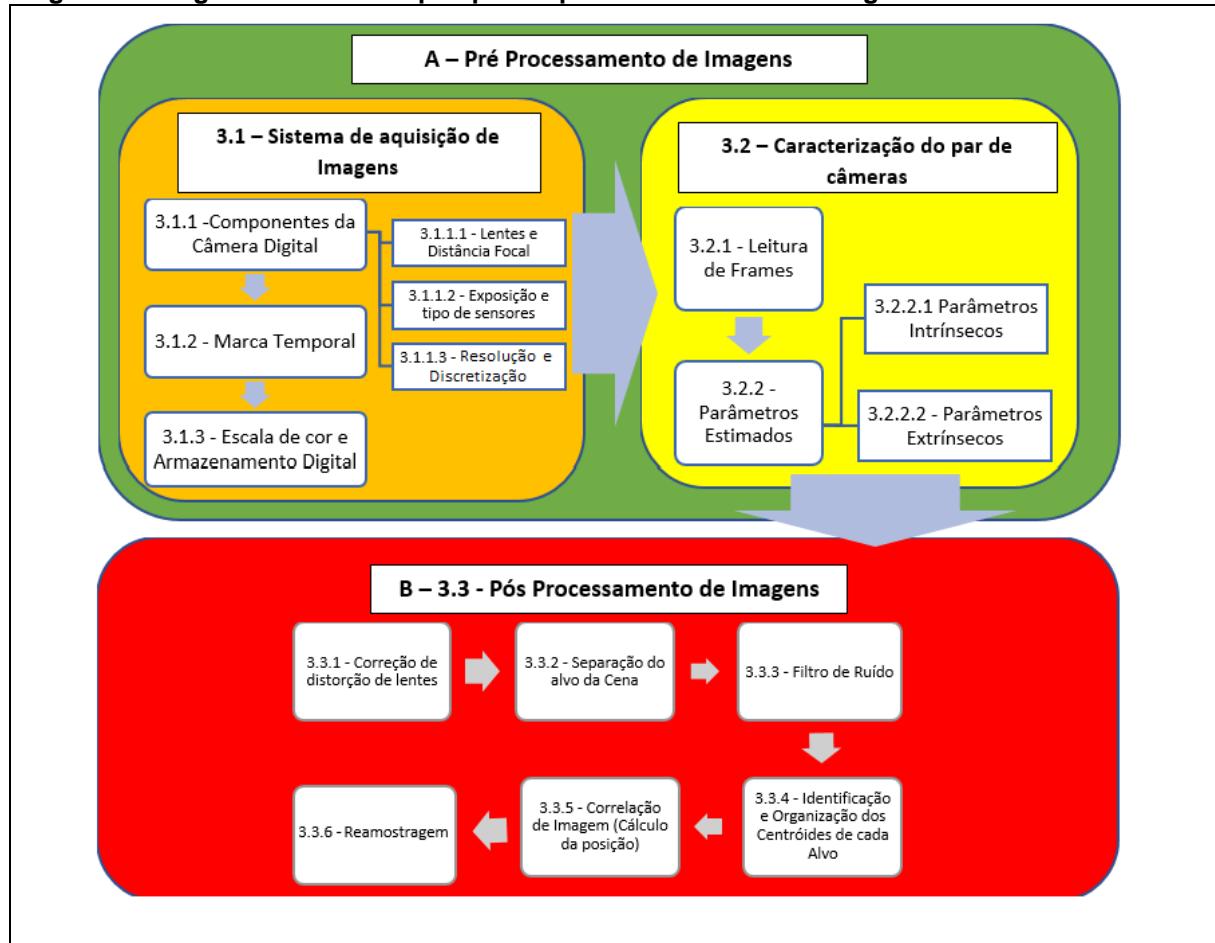
2.1 Objetivos específicos

- 1) Implementar numericamente o código de configuração e aquisição de imagens sincronizadas por um par de câmeras;
- 2) Montar o aparato experimental e extração de fotos do padrão no formato de tabuleiro através do par de câmeras de maneira sincronizada com o algoritmo de aquisição;
- 3) Identificar os parâmetros intrínsecos e extrínsecos do par de câmeras (caracterização) pelo método de Zhang (2000) através da toolbox desenvolvida por Bouguet (2018) em ambiente MATLAB;
- 4) Desenvolver o aparato experimental para a realização de movimento de um atuador eletromecânico (Shaker) controlado experimentalmente;
- 5) Realizar a filmagem da haste do atuador através do código de aquisição do objetivo 1;
- 6) Adquirir o movimento da haste do atuador utilizando um acelerômetro e uma placa de aquisição;
- 7) Implementar numericamente o código de processamento digital de imagens para determinação da posição pontual do objeto a partir do par de imagens;
- 8) Realizar o processamento de imagens obtidas do movimento filmado através do código de processamento de imagens digital do Objetivo 7;
- 9) Verificar os sinais de aceleração em relação ao tempo, através da identificação dos picos de frequência no auto espectro utilizando processamento de imagens do objetivo 8 e comparar com a leitura do acelerômetro do objetivo 6.

3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Este capítulo tem como objetivo descrever a fundamentação teórica das etapas necessárias para aquisição de medidas experimentais através do sistema de aquisição de imagens, composto por um par de câmeras fixas do tipo webcam e um computador. Desta forma, a estrutura da organização apresentada nas seções e subseções desta fundamentação teórica também se trata da ordem da metodologia empregada para obtenção dos resultados, agrupados em três grandes etapas, Sistema de aquisição de Imagens, Caracterização do par de Câmeras e Pós Processamento de Imagens; onde todas necessitam de apoio computacional. O diagrama da Figura 1 ilustra todas as etapas desta metodologia em suas respectivas seções, sendo estas complementares entre si e que devem ser executados em sequência para a obtenção dos resultados esperados conforme será discutido nas seções subsequentes.

Figura 1 - Diagrama com as etapas para o processamento das imagens.



Fonte: Autoria Própria

As três etapas são divididas em dois grandes grupos classificando o tratamento do sinal adquirido pelo sistema de aquisição em pré-processamento (em A) e pós processamento de imagens (em B). Os temas relacionados aos procedimentos de pré-processamento em verde (A), envolvem a aquisição de imagens digitais (seção 3.1) e extração das propriedades físicas das câmeras através da calibração (seção 3.2). O pós-processamento é representado pela cor em vermelho (B, seção 3.3).

A aquisição de imagens abordada na seção 3.1, descreve com detalhes o processo de preparação e configuração do sistema de aquisição de imagens. Assim a subseção 3.1.1 discute as propriedades físicas de câmeras que podem interferir diretamente no processo de medição de grandezas espaciais e obtenção de imagens. Na subseção 3.1.2 é descrito como é realizada a identificação temporal dos frames obtidos através do sistema de aquisição. Por fim na subseção 3.1.3 é apresentado o espaço em memória necessário para armazenamento dos frames em função da discretização da escala de cores e resolução de Imagem.

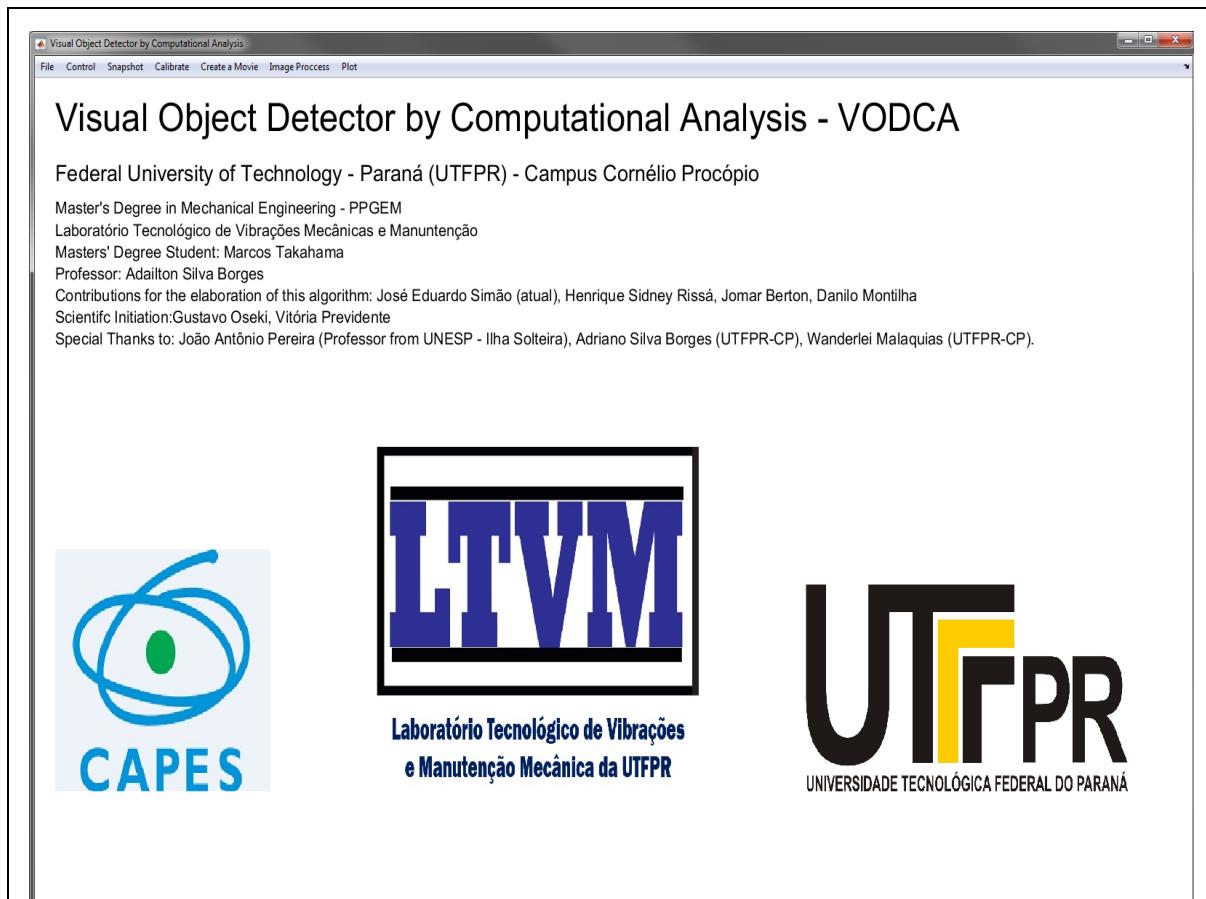
A etapa de calibração (seção 3.2) descreve o procedimento de caracterização do par de câmeras através de uma toolbox disponível no ambiente MATLAB implementada por Bouguet (2018), sendo as rotinas de obtenção das informações das webcams calculados por meio de informações extraídas de imagens de um padrão. A identificação deste padrão é descrita na subseção 3.2.1 através da leitura de fotos de uma forma de tabuleiro em diversas posições. O processo de caracterização e identificação das informações de propriedades das câmeras são apresentadas na subseção 3.2.2, sendo estas intrínsecas (individuais) de cada câmera conforme apresentadas no subseção 3.2.2.1 e extrínsecas (do par de câmera em relação a um referencial e posicionamento entre o próprio par de câmeras) na subseção 3.2.2.1.

O pós-processamento (seção 3.3) trata-se do cálculo do movimento do objeto obtido pelo sistema de aquisição. Assim a determinação deste posicionamento pontual do objeto nas imagens é realizada por meio de técnicas de processamento de imagens desenvolvidos através de implementação numérica no software MATLAB e também por técnicas descritas nos trabalhos de Sabino (2013), Leonardi (2015), Berton Junior (2016) e Rissá (2017). Este processo é realizado com a correção da distorção das lentes (subseção 3.3.1), separação do alvo em relação à cena observada (subseção 3.3.2), aplicação de filtro de ruído para pequenos objetos

(subseção 3.3.3), identificação e indexação dos centroides de cada alvo (subseção 3.3.4), cálculo da posição destes alvos através de correlação de imagem (subseção 3.3.5) por meio da técnica de triangulação pontual descrita por Hartley e Zisserman (2003) no livro “Multiple View Geometry in Computer Vision” e por último o tratamento do sinal do obtido (subseção 3.3.6).

É importante ressaltar que algumas sub-rotinas já haviam sido desenvolvidas e tratados em trabalhos anteriores no âmbito do Laboratório Tecnológico de Vibrações Mecânicas e Manutenção (LTVM), como nos trabalhos de Leonardi (2015), Berton Junior (2016) e Rissá (2017). Estas rotinas foram otimizadas reduzindo consideravelmente o tempo processamento e também adaptadas para uma interface gráfica ao usuário denominado VODCA conforme apresentado na Figura 2, com o objetivo de facilitar disseminação do conhecimento adquirido pelo autor na forma de uma ferramenta e colaborar com pesquisas futuras, nas mais diversas áreas de aquisição de dados.

Figura 2– Interface gráfica VODCA do algoritmo.

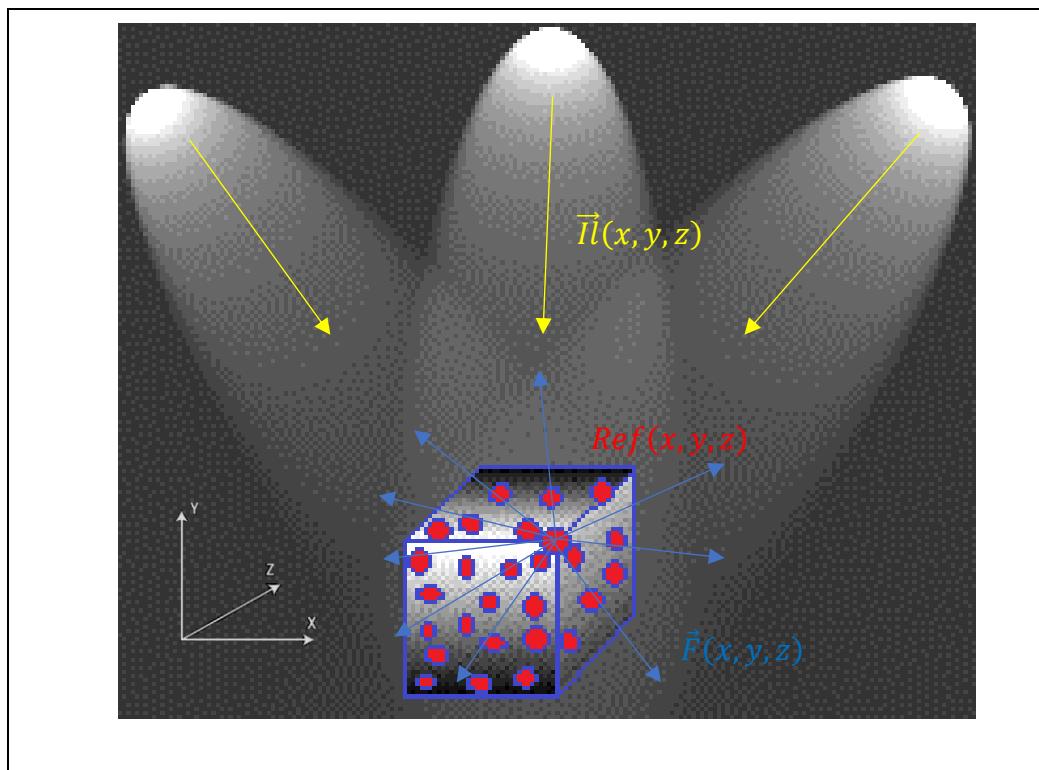


Fonte: Autoria Própria .

3.1 Sistema de aquisição de imagens digitais

Na presente seção será apresentando o conceito do fenômeno de reflexão de luz com o objetivo de compreender melhor os conceitos da captura de uma imagem. Iniciamos então com o exemplo de um cubo iluminado por uma fonte de luz, onde cada ponto do cubo no sistema de coordenadas x, y e z forma sua imagem visível apresentada na Figura 3, devido ao fenômeno de reflexão de luz representado pela função $\vec{F}(x, y, z)$. Isso é consequência da interação dos vetores de quantidade de luz $\vec{Il}(x, y, z)$ originado da fonte de luz e a propriedade intrínseca refletância $Ref(x, y, z)$ de cada ponto infinitesimal que compõe o objeto.

Figura 3 – Componentes de iluminância \vec{Il} e refletância Ref em infinitos pontos localizados nas faces de um cubo.



Fonte: Adaptado de MARQUES FILHO, 1999 .

A função de intensidade de luz observada representada por \vec{F} , é resultante da interação entre a iluminância \vec{Il} (quantidade de luz) incidente sobre infinitos pontos do objeto em observação e a propriedade de refletância Ref (ou transmitância) própria

destes pontos no objeto (MARQUES FILHO, 1999), e pode ser expressa de maneira analítica pelo produto destas propriedades conforme representado pela Equação (1):

$$\vec{F}(x, y, z) = \vec{Il}(x, y, z) \cdot Ref(x, y, z) \quad (1)$$

Sendo: $0 < \vec{Il}(x, y, z) < \infty$ e $0 < Ref(x, y, z) < 1$

Desta forma é possível concluir que o conjunto destes pontos de reflexão de luz $\vec{F}(x, y, z)$ torna o formato do objeto visível, pois cada ponto visível do cubo realiza a representação visual organizada de cada porção de massa infinitesimal que o compõe. O Quadro 1 demonstra alguns exemplos de valor como referência na prática, dos parâmetros físicos de iluminância e refletância respectivamente.

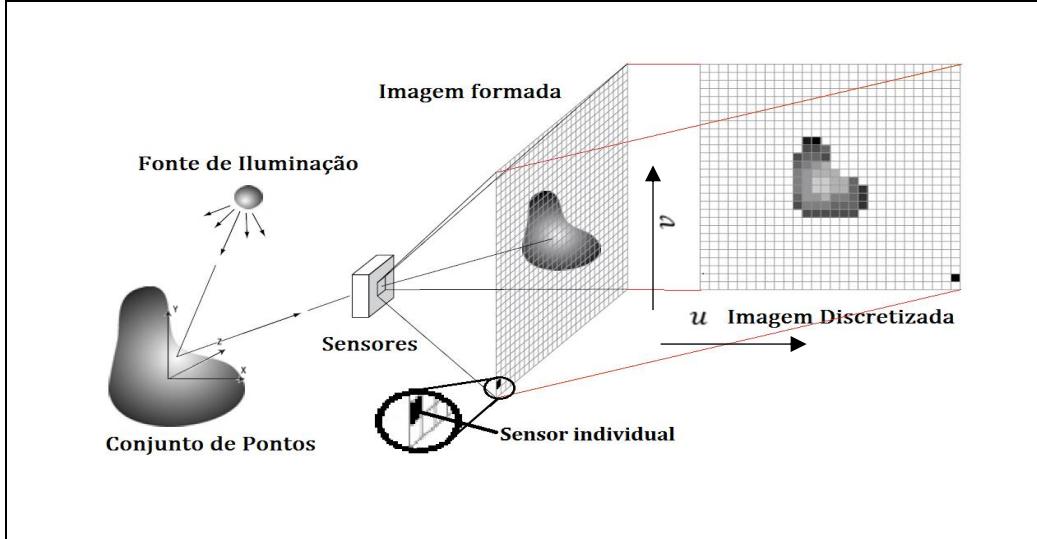
Quadro 1 – Exemplo de valores para $\vec{Il}(x, y, z)$ [em lux ou lúmen/m²] e para $Ref(x, y, z)$.

$\vec{Il}(x, y, z)$ [lux]	Fonte de luminosidade	$Ref(x, y, z)$	Objeto
900	Dia ensolarado	0,93	Neve
100	Dia nublado	0,80	Parede branca-fosca
10	Iluminação de escritório	0,65	Aço Inoxidável
0,001	Noite clara de lua cheia	0,01	Veludo preto

Fonte: Adaptado de MARQUES FILHO, 1999.

A imagem discreta (imagem digital) trata da representação visual através de um número finito de pontos de uma imagem contínua e pode ser obtida através do posicionamento em forma matricial de sensores individuais em um dispositivo óptico. Cada sensor possui o objetivo de capturar uma intensidade de pontos de reflexão de luz, do objeto de interesse, de forma a reproduzir a imagem original observada conforme ilustrado na Figura 4.

Figura 4– Discretização de uma imagem observada.



Fonte: Adaptado de Gonzales, 2008.

A matriz de sensores individuais forma um plano de duas dimensões representados pelos eixos u, v e cada intensidade de cor captada pelos sensores individuais reproduz proporcionalmente a reflexão de luz captada do objeto, observado em uma escala de cores. Esta reprodução na forma de imagem discretizada é denominada como pixel.

Se a fonte de iluminação e a posição dos sensores permanecem fixas, o movimento de um objeto em deslocamento observado no espaço contínuo, também deverá ser reproduzido na imagem finita de maneira organizada. A captura deste movimento através de uma sucessão de frames em uma linha temporal como é realizado em vídeos, possibilita quantificá-lo e reproduzi-lo. Este monitoramento de posição pode ser considerado como um sinal, por representar um suporte físico que carrega consigo uma informação (GONZALES e WOODS, 2008).

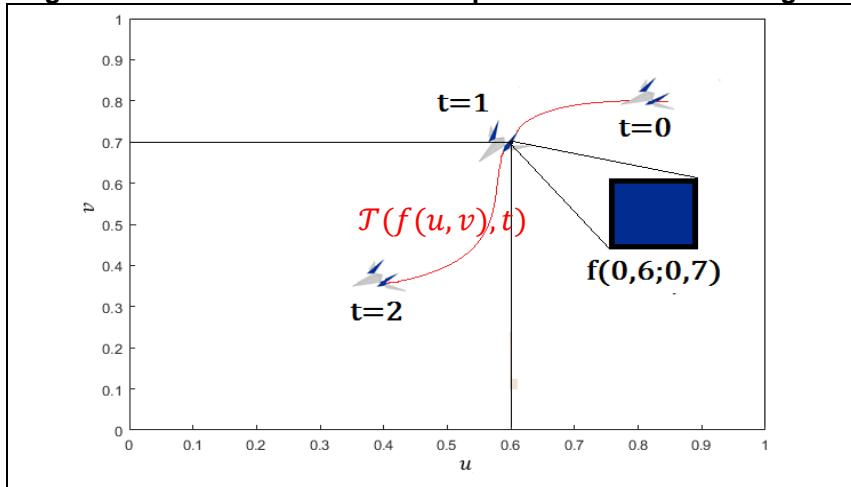
Assim, a transformação de uma imagem ou um conjunto de imagens ao longo de um tempo t na forma de sinal pode ser expressada na forma matemática pela Equação (2)

$$\vec{F}(x, y, z) \rightarrow f(u, v) \rightarrow T(f(u, v), t) \quad (2)$$

Onde o vetor \vec{F} é a intensidade luminosa no espaço x, y, z , a função f é a intensidade de cor no plano da imagem digital (u, v) e \mathcal{T} é o tratamento da posição de um objeto na imagem digital em forma de sinal ao longo do tempo t .

Na Figura 5 é ilustrada a reprodução do movimento de uma nave em movimento no espaço X, Y, Z em uma imagem bidimensional de plano u, v .

Figura 5 – Intensidade luminosa no par de eixos de uma imagem.



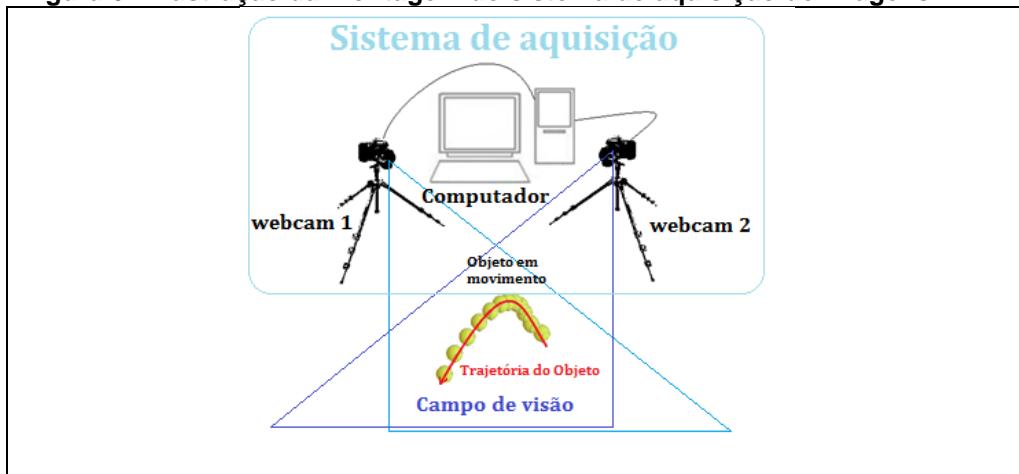
Fonte: Autoria própria.

A observação da trajetória do alvo na cor azul localizada na asa da nave em diversos intervalos de tempo representada pela linha vermelha, muda de posição em diferentes instantes de tempo t (0, 1 e 2), portanto a observação da sua trajetória também é um monitoramento de sinal $\mathcal{T}(f(u, v), t)$. Neste exemplo, quando o alvo é detectado o instante de tempo $t = 1$ possuirá uma localização, de coordenada 0,6 e 0,7 em u e v (eixos das coordenadas do plano) respectivamente.

Para o cálculo da posição real do objeto a ser reproduzido a partir de imagens digitais, também é necessário o conhecimento das características físicas do funcionamento dos componentes que compõe o sistema de aquisição imagens utilizadas.

Neste estudo o sistema de aquisição de imagens digitais trata de um par de webcams com a função de sensor; e um computador com função de realizar aquisição e armazenamento de imagens e posteriormente processar os dados. A ilustração da montagem experimental que se propõe é apresentado conforme a Figura 6.

Figura 6 – Ilustração da montagem do sistema de aquisição de imagens.



Fonte: Autoria própria.

No decorrer desta seção serão descritos os componentes deste sistema de aquisição que influenciam diretamente as medidas espaciais e temporais no processo de cálculo de posição de um objeto a partir das imagens digitais obtidas.

Assim na subseção 3.1.1 serão descritos os componentes necessários para o funcionamento de uma câmera digital genérica (lentes, sensor, processador e armazenamento) e seus respectivos ajustes. Na subseção 3.1.2 é descrito como é realizado o registro temporal de cada frame de imagem obtida, e por fim na subseção 3.1.3, é apresentado a discretização da escala de cor utilizada e espaço ocupado no armazenamento digital.

3.1.1 Componentes da Câmera Digital

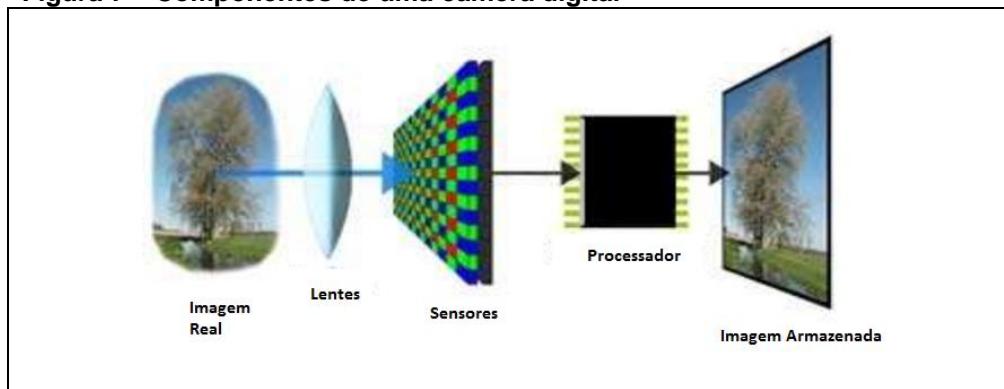
A câmera portátil digital surgiu em meados dos anos 80 com a substituição dos antigos rolos de filme para armazenamento da imagem capturada para um formato digital, por consequência a demora de horas para a revelação destas imagens armazenadas em papel, foram substituídas popularmente pela sua reprodução em visores digitais. Internamente nas câmeras antigas, foram substituídas por componentes que possibilitam a transformação do sinal analógico em um sinal armazenado na forma digital. Nesta inovação tecnológica quatro tipos construtivos de

câmeras digitais tornaram-se mais populares: compacta, bridge, SLR (Single Lens Reflex) e a híbrida.

A câmera compacta originada dos anos 80, é um sistema de aquisição de imagem de tamanho mínimo, contendo apenas os componentes necessários para seu funcionamento. Em 1995 a câmera do tipo bridge surgiu no mercado com a função de visualização da imagem antes do seu armazenamento. Esta nova tecnologia empregou o uso de espelhos para retornar ao usuário a imagem real depois de tirar a foto. Nesta mesma época surgiu também, o desenvolvimento da tecnologia SLR, também denominado como “zoom óptico”, que possibilitou a utilização de uma lente intercambiável objetiva, com a funcionalidade de alterar a distância focal do objeto em relação ao plano onde a imagem é formada. Então desde 2010 as câmeras hibridas ao qual empregam a tecnologia das câmeras atuais se diferenciam por proporcionar a visualização da imagem digital previamente por meio de uma peça eletrônica (MAITRE, 2015).

Internamente, em todas as câmeras digitais citadas, para que o processo de transformação de uma imagem real (imagem analógica) para o domínio virtual (imagem digital) ocorra, é necessário a utilização de componentes físicos como um conjunto de lentes responsáveis pela convergência de luz do ambiente externo para um sensor de captura de luminosidade e um processador para organizar as informações no domínio discreto e armazenamento de informações através de uma mídia de armazenamento de dados (BERTON JUNIOR, 2016) conforme ilustrados na Figura 7. As características funcionais destes componentes serão descritas com mais detalhes nas próximas subseções.

Figura 7 – Componentes de uma câmera digital



Fonte: Adaptado de BERTON JUNIOR(2016).

3.1.1.1 Lentes e distância focal

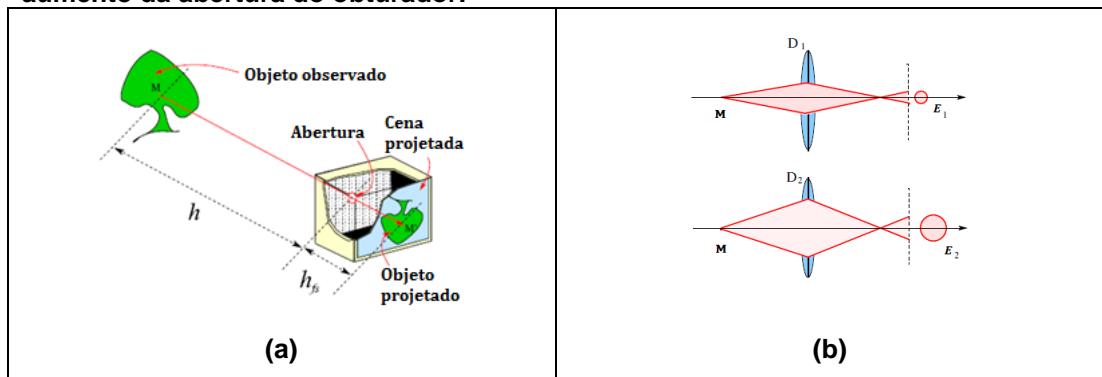
As lentes desempenham papel importante para a captura de imagens, pois possuem função de direcionar a luz emitida do meio real para o sensor. O desenvolvimento do conjunto de lentes leva em consideração o equipamento que vai empregá-la, comercialmente divididos em quatro grupos de acordo com a aplicação: Lentes para câmera, Telescópio-Objetivas, Micro Objetivas e lente ocular para telescópios e microscópios. O projeto de sua construção leva em conta as características do equipamento, layout de projeto, o tipo de superfície a ser filmada e a tolerância para sua fabricação (VELZEL, 2014).

Características físicas da construção de lentes devem ser consideradas no processo de aferição de medidas, este assunto será discutido com maiores detalhes na seção 3.2.2.1.

3.1.1.2 Exposição e tipos de sensores

O nome atribuído ao elemento responsável pela entrada controlada de luz e tempo de exposição no sensor de uma câmera, é denominado obturador ou diafragma. Trata-se de um componente interno normalmente localizado perto da lente. A representação deste componente é apresentado na Figura 8 (a), com a observação de um objeto M e sua respectiva imagem projetada no sensor. Na Figura 8 (b) é representada a maneira que a variação do tamanho da abertura do obturador de D_1 para D_2 altera a passagem luminosa de E_1 para E_2 .

Figura 8 – (a) Localização do obturador e (b) aumento da passagem de luz com o aumento da abertura do obturador.



Fonte: MAITRE (2015, p.15).

As velocidades de abertura do diafragma são normalmente designados por N da relação da Equação (3), onde é relacionado o tamanho da abertura do obturador definido pelo diâmetro D em milímetros e a distância focal h_{fs} .

$$N = \frac{h_{fs}}{D} \quad (3)$$

Assim os tipos mais comuns de abertura são: $h_{fs}/1$, $h_{fs}/1,4$, $h_{fs}/2$, $h_{fs}/2,8$, $h_{fs}/4$, $h_{fs}/5,6$, $h_{fs}/8$, $h_{fs}/11$, $h_{fs}/16$, $h_{fs}/22$, $h_{fs}/32$, $h_{fs}/45$ e $h_{fs}/64$ (MAITRE, 2015).

Diâmetros maiores de obturador são utilizados para determinar a posição de objetos em movimento com maior nitidez devido ao tempo de exposição do sensor à luz. No exemplo da Figura 9, a mesma cena de um ciclista é observada com a variação do tamanho do obturador de $h_{fs}/15$ em (a), $h_{fs}/60$ em (b) e $h_{fs}/1000$ em (c). Nota-se que quanto maior a abertura, mais nítida é a imagem do ciclista observado pela câmera.

Figura 9 - (a) Velocidade do obturador de 1/15, (b) velocidade do obturador de 1/60, (c) velocidade do obturador de 1/1000.



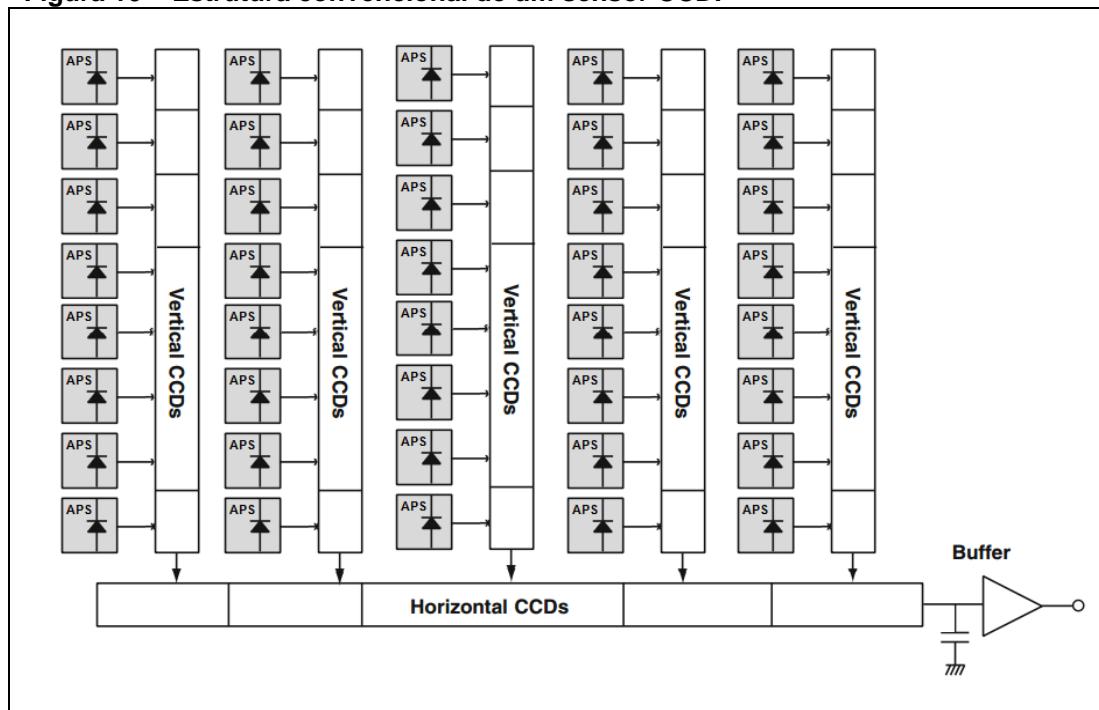
Fonte: Rissá, 2017.

Além do obturador, sensores também são responsáveis pela captação da imagem analógica ainda na câmera e sua função é transformar o sinal luminoso (obtido da reflexão de luz do objeto) em sinal elétrico. Tal procedimento é realizado através de colunas de sensores foto-sensíveis, denominados APS (*active pixel sensor*) que podem ser do tipo CCD (*charge coupled device*) ou CMOS (*complementary metal-oxide-semiconductor*).

Sensores CCD contém capacitores individuais (sensores APS) fisicamente alocados em colunas, tendo a capacidade de registrar uma imagem analógica por uma leitura única de carga no sensor CCD Horizontal, mesmo se houver sobreposição de

sinais na leitura do CCD Vertical. Além disso oferecem garantia de qualidade de imagem por utilizar foto-sensores devido à sua funcionalidade de operar com baixa corrente, baixo ruído de sinal e alta sensibilidade. A limitação da tecnologia CCD se caracteriza principalmente por necessitar de uma alta carga de energia em cada leitura de sinal e captura da imagem de maneira uniforme, a Figura 10 ilustra o arranjo dos sensores APS para este tipo sistema.

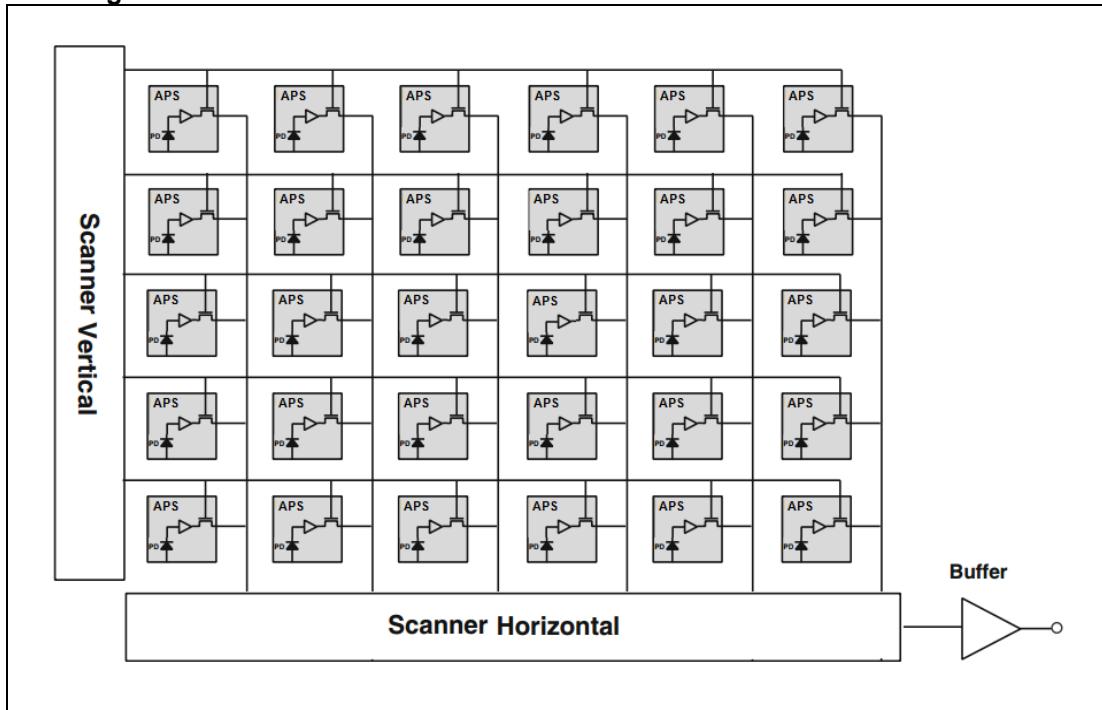
Figura 10 – Estrutura convencional de um sensor CCD.



Fonte: Adaptado de PARK J.(2016).

Diferente da tecnologia CCD, os sensores CMOS se diferem pela alocação dos sensores APS ligado em linhas e colunas. O sinal passa por todos circuitos de maneira sequencial, na horizontal e vertical, e um circuito paralelo fora do sistema é responsável por organizar a leitura das amostras (Scanner) para leitura destes sinais conforme ilustrado na Figura 11. A limitação da tecnologia CMOS se caracteriza por necessitar baixa carga de energia em cada leitura de sinal, porém a captura da imagem pode apresentar distorções devido ao efeito “*Rolling Shutter*” conforme descrito no trabalho de Leonardi (2015).

Figura 11 – Estrutura convencional de um sensor CMOS.



Fonte: Adaptado de PARK J.(2016).

3.1.1.3 Resolução de imagem e discretização espacial

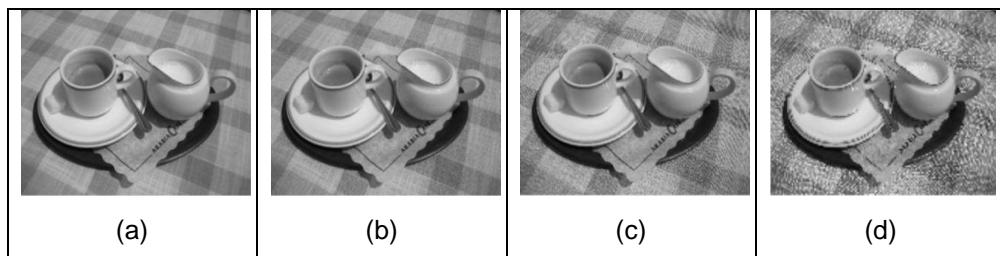
O Pixel é o nome atribuído a cada elemento finito pontual que compõe uma imagem digital e segundo Meneses et al. (2012) determina o tamanho do menor objeto identificado, quando o tamanho deste é no mínimo metade do tamanho do objeto medido na sua menor dimensão.

Nas palavras de Rissá (2017), a discretização espacial da imagem, na forma de uma matriz bidimensional, se refere à quantidade de amostras da cena que serão adquiridas por uma unidade de comprimento. Assim, quanto maior a quantidade de pixels amostrados maior será a resolução espacial da imagem construída.

A quantidade de pontos utilizados para compor uma imagem digital está diretamente relacionada com a capacidade de discretização espacial, no processo de amostragem de acordo com a quantidade de sensores APS organizados na forma de matriz, onde cada pixel representa uma pequena área da reflexão de luz capturada pelo sensor fotossensível. No exemplo da Figura 12 é ilustrado o efeito da mudança de resolução de uma imagem capturada no formato digital Figura 12 (a) de tamanho 1944x2592 em 1250 pontos por polegada (Dots Per Inch - DPI), a mesma imagem com resolução espacial reduzida Figura 12 (b) com 300 dpi, 150dpi Figura 12 (c) e

72dpi Figura 12 (d). Nota-se o efeito da pixelização e perda de detalhes progressiva devido a menor discretização espacial na imagem digital.

Figura 12 – Escala de resolução de uma foto em (a) 1250 DPI, (b) 300 DPI, (c) 150 DPI e (d) 72 DPI.



Fonte: MARQUES, 2011.

3.1.2 Marca Temporal

As câmeras portáteis disponibilizam valores de taxa de aquisição combinado com uma resolução definidas por fábrica de acordo com a limitação do dispositivo. A capacidade de aquisição por sua vez, influencia diretamente na precisão de medidas dinâmicas devido à identificação da posição temporal do frame de maneira análoga à resolução em pixels do tamanho da imagem que define diretamente na precisão de localização da posição de um objeto na forma de imagem.

Ainda sobre a taxa de aquisição, de maneira distinta as câmeras compactas portáteis que possuem clock de processamento interno dedicado, nas webcams a aquisição de imagens pode não possuir uma taxa de aquisição constante pois existe atraso no armazenamento de imagens quando o sistema operacional não é dedicado e também certa limitação da taxa de captura de imagens da própria webcam. Esta incerteza da capacidade de aquisição de imagens de forma constante, torna necessária a realização de uma marcação temporal após o armazenamento de cada quadro obtido, uma vez que o computador não possui processamento dedicado para permitir aquisição de imagens em tempo constante.

A coleta de imagens através de um sistema de aquisição de imagens sincronizadas deve armazenar a posição temporal de cada frame em uma sub-rotina de aquisição de imagens conforme o loop de aquisição apresentado de forma ilustrativa no diagrama da Figura 13.

Figura 13 – Aquisição de imagens utilizando Webcam.



Fonte: Autoria Própria.

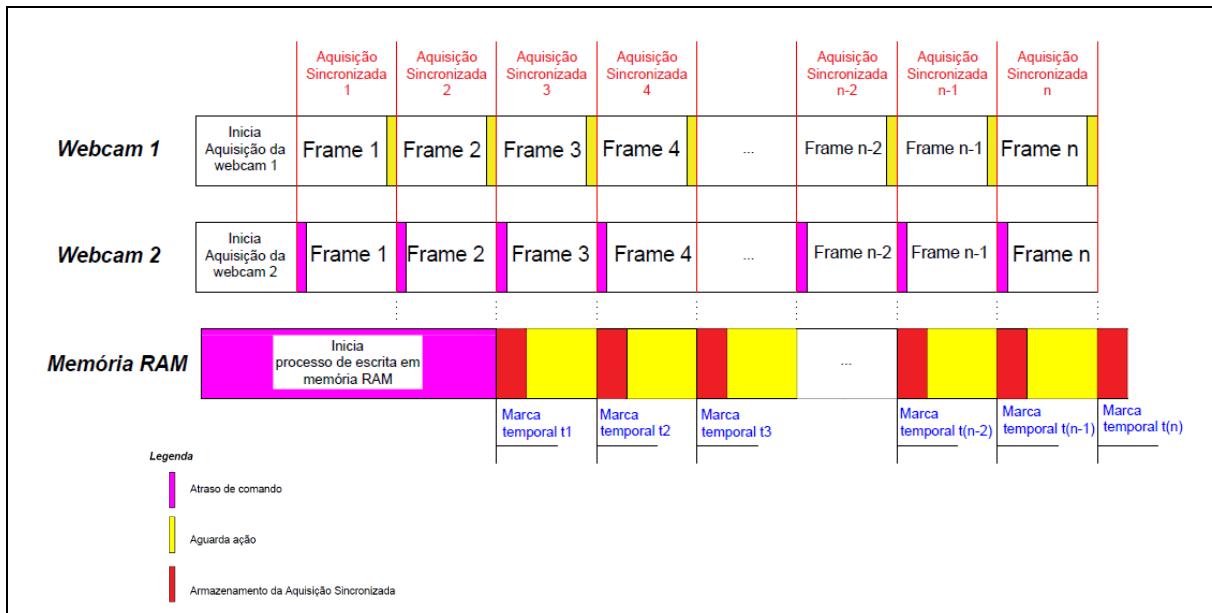
No diagrama apresentado na Figura 13 a primeira etapa determina previamente as propriedades da aquisição como quantidade de frames necessárias para análise e o tamanho da imagem (resolução em pixels). Na segunda etapa, é realizada a alocação do espaço em memória RAM no computador para o armazenamento dos frames de imagem. A terceira etapa trata da aquisição dos quadros obtidos por meio das webcams e preenchimento do espaço alocado em memória RAM com as imagens. Ainda na terceira etapa, a identificação temporal de cada quadro é realizada ao fim da aquisição do par de imagens em um vetor de tempo durante a realização do loop. A aquisição encerra com a quarta etapa e então os frames de vídeo da memória RAM são salvos no Disco Rígido do computador

O registro temporal no loop de aquisição também possui limitações, pois depende da capacidade de discretização temporal do computador e, caso ocorra atraso (delay) no instante em que cada sinal é enviado do computador para cada webcam, isto será quantificado. Ainda existe a possibilidade de atraso de aquisição entre o par de webcams, contudo verificou-se experimentalmente que este atraso não afeta os resultados experimentais caso o tempo de atraso de aquisição entre câmeras seja muito menor do que taxa de aquisição (na ordem de 10^{-3} vezes).

A Figura 14 demonstra uma análise em linha temporal da utilização do par de webcams e do registro de tempo e imagem na memória RAM do computador utilizados no processo de aquisição. Os atrasos de sinal anteriormente citados são

identificados no algoritmo de aquisição com a cor roxa, o período de ociosidade é representado em amarelo e o período de tempo ocupado pelo armazenamento da imagem sincronizada em memória em vermelho.

Figura 14– Linha temporal de execução do loop de aquisição.



Fonte: Autoria Própria.

Nota-se também que caso aquisição de imagens pelo par sincronizado de webcams se inicie anteriormente ao armazenamento de frames, haverá perda de imagens no início da aquisição, contudo a contagem temporal só inicia após o registro do primeiro frame em memória RAM e se sucede até a aquisição do último frame, não afetando as amostras registradas.

A capacidade total de armazenamento de frames de vídeo da gravação dependerá do espaço disponível em memória RAM e é diretamente proporcional a quantidade de frames de vídeo. O cálculo deste espaço necessário será explicado com mais detalhes na próxima seção (Subseção 3.1.3).

3.1.3 Escala de cor e Armazenamento digital

Após a leitura de uma informação em cada sensor APS individualmente descrito anteriormente na subseção 3.1.1.2, a conversão do sinal luminoso analógico é convertida em digital. Segundo Park J. (2016) podemos tratar o processo de discretização de forma analítica considerando E um sinal de 1 Volt analógico, através

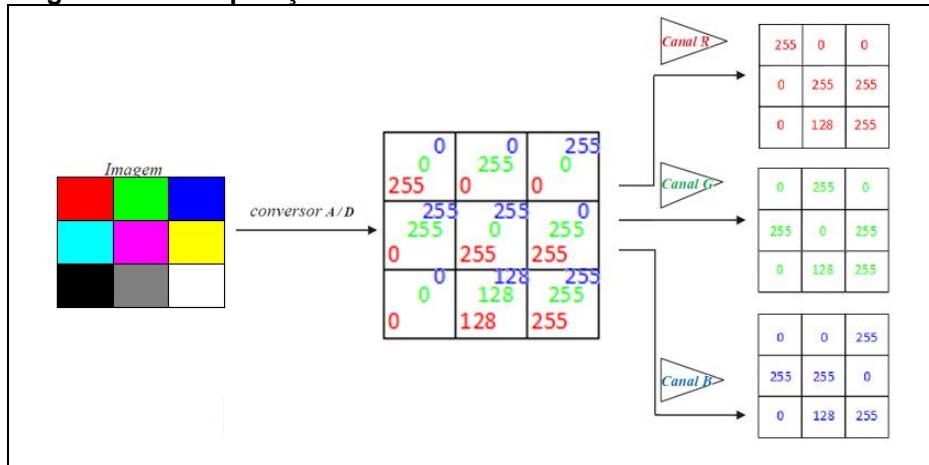
da Equação (4), onde RD representa a intensidade de vermelho, GD a intensidade em verde, BD intensidade em azul e o operador int o arredondamento para um número inteiro:

$$\begin{cases} R \\ G \\ B \end{cases} = \begin{cases} int(219 * E_{RD}) + 16 \\ int(219 * E_{GD}) + 16 \\ int(219 * E_{BD}) + 16 \end{cases} \quad (4)$$

Esta representação da cor na escala RGB é a forma mais simples de armazenamento e tratamento da informação obtida após a leitura deste sinal já digital. Esta representação é capaz de definir uma cor em um gradiente de cores, através de 3 camadas de canais de cores principais (vermelha, verde e azul) em níveis de intensidade que variam de 0 a 255. A mistura de cada uma destas três cores nesta escala de intensidade pode gerar até 16,7 milhões combinações, conhecido também tecnicamente como imagens 24 bits, pois são compostas por 3 canais de 8 bits de informação de cores por pixel (KEESE, 2013).

Após a identificação de cada intensidade de cor, o armazenamento digital de cada frame de vídeo é realizado na forma de matriz de pixels em um sistema de cores. No caso do sistema RGB é realizado na forma de 3 matrizes (um para cada canal de cor), conforme ilustrado pela Figura 15. Assim o tamanho da matriz é determinado pela resolução máxima, e cada uma das camadas de cores deve representar um canal de cor contendo a sua intensidade em cada célula de maneira numérica.

Figura 15 – Composição de cores na forma matricial.



Fonte: Autoria Própria.

O espaço em disco ocupado pela imagem digital pode ser calculado em função da resolução e da definição da discretização da intensidade de cor em sua escala. Se a imagem digital colorida for armazenada no sistema RGB a discretização da intensidade de cor terá 24 bits (3 componentes de cada canal ocupando 8 bits). Assim podemos definir o espaço total em disco (bits) ocupado por uma imagem em RGB pela Equação (5).

$$\text{Tamanho em disco} = u_{\max} * v_{\max} * Ch * Ds \quad (5)$$

Onde u_{\max} representa a quantidade de pixels no eixo u de uma imagem, v_{\max} representa a quantidade de pixels no eixo v da imagem, Ch representa a quantidade de canais de cores da escala de cor desejada e Ds representa a capacidade de discretização da escala de cor em cada um dos canais de cores. De maneira resumida podemos tratar o tamanho em memória ocupada por uma imagem digital na escala RGB pela Equação (6):

$$\text{Tamanho em disco} = u_{\max} * v_{\max} * 3 * 2^8 \quad (6)$$

O Quadro 2 apresenta aproximadamente o espaço em disco ocupado por uma sucessão imagens em escala RGB na memória em escala de megabytes (2^6 bytes ou 2^{24} bits).

Quadro 2 – Tamanho em megabytes de sucessão de imagens em escala RGB.

Espaço em memória (MB)		Quantidade de Quadros			
Tamanho da imagem (Pixels)	Proporção	1	50	250	1000
360 x 640	4:3	0,23	11,52	57,60	230,40
640 x 480 (VGA)	4:3	0,92	46,08	230,40	921,60
800 x 600 (SVGA)	4:3	1,44	72,00	360,00	1.440,00
1024 x 768 (XGA)	4:3	2,36	117,96	589,82	2.359,30
1280 x 720 (WXGA-HD)	16:9	2,76	138,24	691,20	2.764,80
1920 x 1080 (Full HD)	16:9	6,22	311,04	1.555,20	6.220,80
3840 x 2160 (4K Ultra)	16:9	24,88	1.244,16	6.220,80	24.883,20

Fonte: Autoria Própria.

3.2 Caracterização do par de câmeras

Até a presente seção foi exposta o conhecimento necessário dos componentes utilizados no processo de captura de uma cena para uma imagem (domínio contínuo para discreto) através de uma câmera digital individual. Será realizado então o caminho inverso, ou seja, transformar a imagem de duas câmeras como ferramenta de medição e encontrar o espectro de frequência do deslocamento absoluto de um objeto em movimento no espaço tridimensional. Para que isto seja possível, é necessário conhecer as características físicas de cada uma das câmeras individualmente e também do conjunto posicionado para ser possível a utilização da correlação de imagens e determinar a posição de um objeto no espaço tridimensional.

A caracterização do par de câmeras nesta metodologia é estimada através da leitura de frames por meio de imagens obtidas de um padrão geométrico no formato de um tabuleiro conforme será discutido na subseção 3.2.1. O padrão geométrico será necessário para caracterização do par de câmeras através da ferramenta disponível já desenvolvida em MATLAB por Bouguet (2018). Este método é realizado de maneira similar ao uso tradicional em sistemas de visão robótica apresentado nos trabalhos de Tsai (1987), Weng, Cohen e Herniou (1992) e nas palavras de Lobão (2004), a utilização deste padrão por meio deste método é frequentemente utilizada pois, entre suas principais características, apresenta flexibilidade e capacidade de realizar uma análise refinada de dispositivos de captura de imagem quando se conta com pouca ou nenhuma informação destes dispositivos.

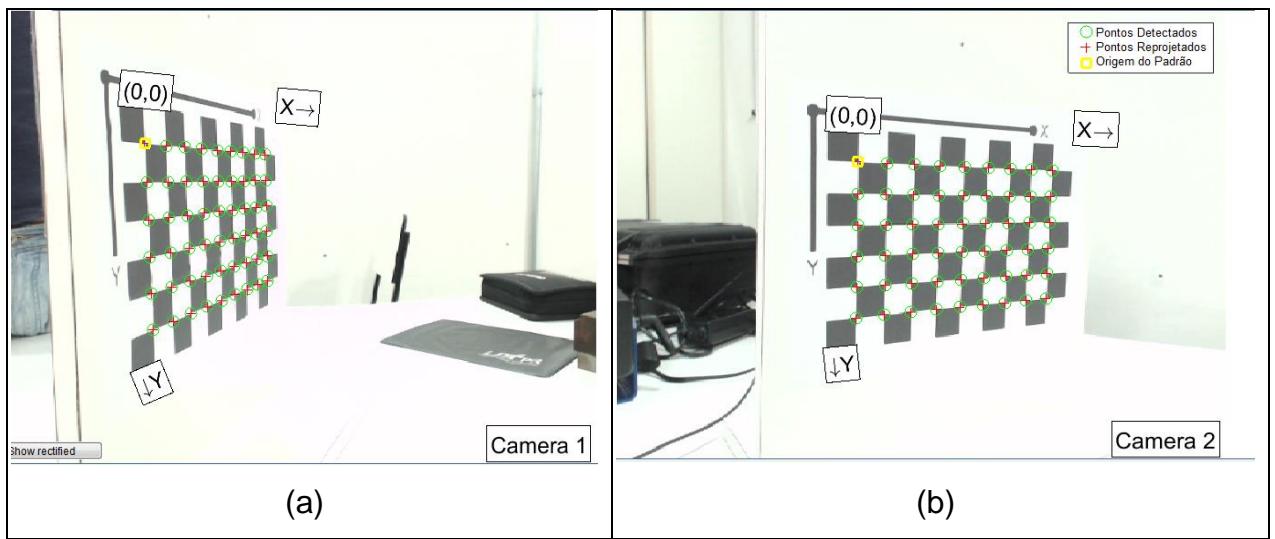
Os parâmetros originados da caracterização das câmeras obtidos nesta metodologia são divididos entre parâmetros intrínsecos e extrínsecos conforme será exposto na subseção 3.2.2.

3.2.1 Leitura de frames do padrão geométrico

A ferramenta desenvolvida por Bouguet (2018) no software MATLAB realiza o processo de identificação dos parâmetros intrínsecos e extrínsecos através da identificação de pontos em um padrão em formato de tabuleiro. Neste método a intersecção das arestas de quadrados são os pontos aos quais servirão de informação de entrada para a identificação das propriedades das câmeras, portanto o tabuleiro deve ser visível e permanecer no campo de visão em ambas as câmeras conforme

demonstrado na Figura 16. Neste tabuleiro, a forma de quadrado é propositalmente definida para que cada alvo fique equidistante e a entrada das dimensões reais dos quadrados e possibilita que a ferramenta calcule as posições relativas dos pontos em relação ao ponto definido como origem e a direção do plano do tabuleiro em relação à câmera.

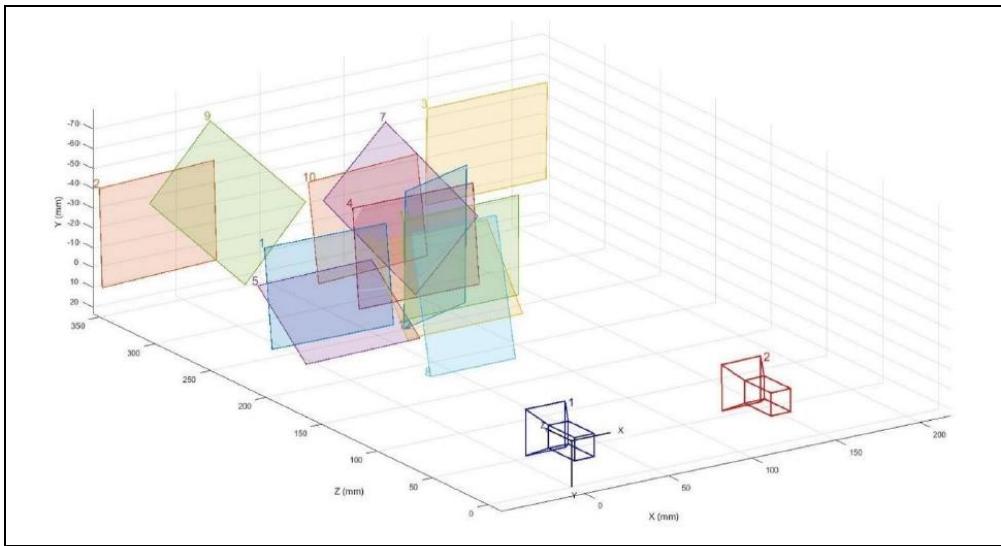
Figura 16 - Identificação dos alvos no padrão do tipo de tabuleiro (a) na câmera 1 e (b) na câmera 2.



Fonte: Autoria Própria.

Assim devem ser adquiridos diversas fotos em diferentes posições deste padrão geométrico, para implementação de uma nuvem de pontos pela toolbox, conforme ilustrado na Figura 17. Com todos os pontos detectados nas imagens (entradas conhecidas) e estimadas as posições relativas destes pontos no plano do tabuleiro informados através da entrada pelo usuário das dimensões reais dos quadrados, a ferramenta estima numericamente todos parâmetros de caracterização para realização do processo de calibração conforme será exposto na próxima subseção 3.2.2.

Figura 17- Identificação de diferentes posições do tabuleiro.



Fonte: BERTON JUNIOR (2016).

3.2.2 Parâmetros Estimados

Os parâmetros Intrínsecos e Extrínsecos são utilizados pelo princípio de transformação de coordenadas da localização do objeto X, Y, Z para o sistema de coordenadas em cada de imagem i individualmente u_i, v_i , relacionados através da Equação (7) de Faugeras (1993).

$$C(u'_i, v'_i) = [M] \cdot [R] \cdot \begin{bmatrix} X_i \\ Y_i \\ Z_i \end{bmatrix} + [T] \quad (7)$$

Cada componente desta Equação 7 será discutida nesta seção sendo estas os parâmetros intrínsecos, os parâmetros que influenciam na formação da imagem em cada câmera individual, neste caso trata-se da correção da distorção da imagem $C(u', v')$ e a correção da centralização de imagem por meio da matriz intrínseca $[M]$.

Os parâmetros definidos e separados como parâmetros extrínsecos, são definidos pelos parâmetros característicos do posicionamento de uma câmera em relação a outra. São elas a matriz $[F]$ chamada matriz fundamental, a matriz $[R]$ no qual representa a correção de rotação de uma câmera em relação a outra e o vetor $[T]$ que representa o vetor de translação de uma câmera também em relação a outra.

O parâmetro Extrínseco que relaciona a posição no espaço entre o par de imagens é denominado matriz Fundamental $[F]$ definido pela função (HARTLEY e ZISSEMAN, 2003) descrita através da Equação (8).

$${p_1}^T \times [F] \cdot p_2 = 0 \quad (8)$$

Esta função estabelece uma relação de um mesmo ponto p observado entre um par de câmeras 1 e 2 conforme será discutido nesta subseção 3.2.2.

Um método de busca numérica de função é utilizado para determinar cada um dos parâmetros da caracterização do par de câmeras. Este processo busca determinar os parâmetros das Equações (7) e (8) por meio de pontos de entrada e pontos de saída. Neste caso as entradas são os pontos p_1 e p_2 (localizados nas imagens do padrão geométrico em forma de tabuleiro conforme já explicado na subseção anterior 3.2.1) e as saídas são os pontos P no espaço X, Y, Z estimados.

A busca é realizada através do método de otimização denominado gradiente descendente conforme descrito no trabalho de Zhang (2000) e implementada na toolbox de calibração de câmera (Stereo Camera Calibrator) de Bouguet (2018) no software MATLAB. Mais informações do processo de ajuste numérico deste processo podem ser encontradas no trabalho de Zhang (2000) e Bouguet (2018).

Desta forma, conhecendo a posição dos pontos p na imagem u, v e sua posição real no espaço X, Y, Z , um processo de busca do coeficientes denominado gradiente descendente, estima os valores das variáveis $[M], [R]$ e $[T]$ e da função C da Equação (7), até atingir o critério de parada determinado pela minimização da distância do erro de reprojeção ε , entre o ponto projetado \hat{P} e o ponto com posição conhecida P_{ij} . Podemos representar o erro de reprojeção ε através da Equação (9).

$$\varepsilon^P = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \|P_{ij} - \hat{P}([M], [R], [T], C(u'_i, v'_i))\|^2 \quad (9)$$

Inicialmente são estimados estes os parâmetros de projeção de imagem de cada câmera individualmente através do procedimento de calibração, posteriormente é realizado o procedimento de busca da matriz fundamental $[F]$.

A matriz fundamental também é estimada com base no método de otimização gradiente descendente com critério de parada determinado pela minimização do erro representado de maneira analítica através da Equação (10).

$$\varepsilon^P = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \left\| \hat{E}([F], p_{1ij}, p_{2ij}) \right\|^2 \quad (10)$$

Onde \hat{E} representa uma função nula, p_1 representa o ponto identificado pela primeira câmera e p_2 representa o mesmo ponto identificado pela segunda câmera.

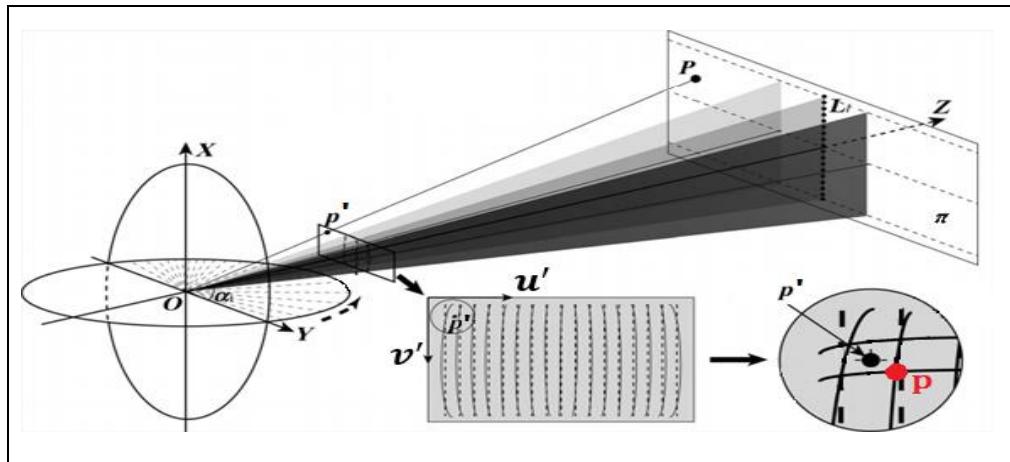
Todos estes parâmetros são necessários para a obtenção do cálculo de posição do objeto no espaço X, Y, Z a partir de um par de imagens discretea (planos $u1, v1$ e $u2, v2$) de perspectivas diferentes através de correlação de imagens conforme será descrita no pós processamento de imagem (Seção 3.3).

3.2.2.1 Parâmetros Intrínsecos

Para que seja possível o uso do processamento de imagens na aferição de medidas, a imagem deve representar a cena de maneira mais próxima possível do ideal. Assim os fatores inerentes das características construtivas das lentes e imperfeições ocasionadas pelas tolerâncias dimensionais no processo de fabricação também devem ser considerados.

As distorções observadas em imagens trazem imprecisão nas medidas e são objeto de uma longa discussão em diversos trabalhos. O modelo proposto por Weng, Cohen e Herniou (1992) apresentado na Figura 18 ilustra o processo de distorção de uma imagem observada do plano π refletida na projeção de uma lente com as principais fontes de distorção citadas em seu trabalho: descentralização, radial e tangencial.

Figura 18 – Processo de distorção de imagem em uma lente.

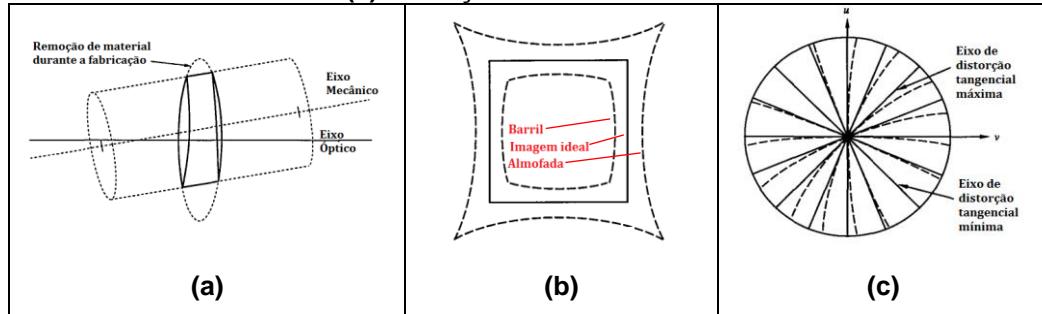


Fonte: Adaptado de WANG, Zhu e Lin (2013).

Com a origem O do sistema de coordenadas do espaço X, Y, Z na origem focal (ponto onde a luminosidade da cena converge na lente), o ponto p' quando projetado no plano da lente u', v' deveria localizar-se no ponto p vermelho em uma lente plana perfeita. Porém devido a cada fator geométrico, tolerâncias dimensionais na construção das lentes e a própria geometria convexa, a projeção do ponto P se localiza em uma nova posição representada pelo ponto p' .

A imperfeição de fabricação e não coincidência de centro do eixo óptico Z de observação com o centro mecânico real L (da Figura 18) é uma distorção denominada descentralização e se caracteriza pelo desalinhamento ou inclinação entre os elementos da lente e o sensor de captura da imagem conforme ilustrado na Figura 19 (a). Outro fator que ocasiona distorção são os efeitos conhecidos como efeito almofada e barril, provenientes da característica construtiva em forma convexa, resultando num aspecto de imagem em forma de elipse na projeção da imagem nas lentes ilustrado na Figura 19 (b). Esta é considerada mais significativa na maioria das câmeras digitais populares (LOBÃO, 2004). Distorções geométricas decorrentes da dispersão dos centros ópticos provocam distorções tangenciais, conforme mostrado na Figura 19 (c), devido à tolerância dimensional do raio do formato das lentes no processo de fabricação. O tratamento da correção das lentes permanece ao lado esquerdo da Equação (7) pois também é parte da etapa de Pós-processamento e será abordado no Seção 3.3.1.

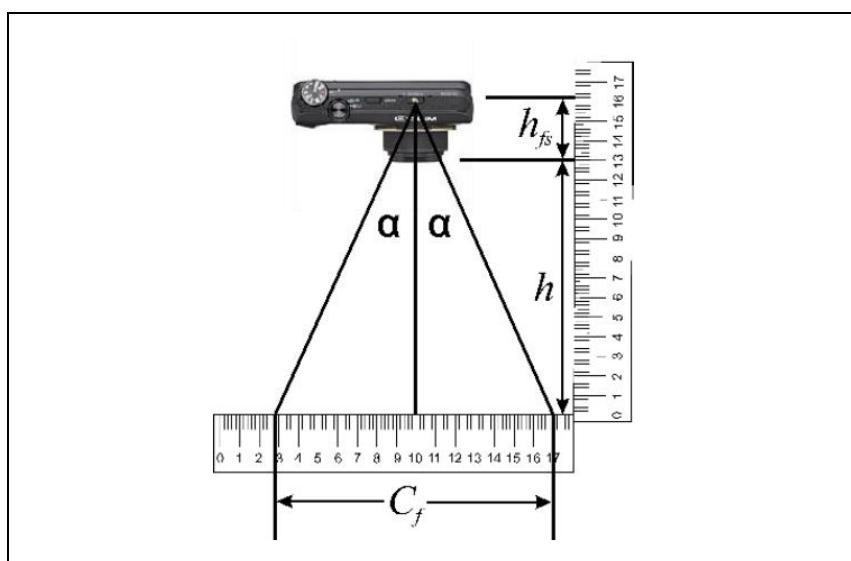
Figura 19 – Imperfeições de imagem, (a) descentralização do eixo mecânico, (b) efeito barril e almoofada e (c) distorção radial.



Fonte: Adaptado de Weng, Cohen e Herniou (1992).

Além das características intrínsecas das lentes, outra propriedade importante é a distância entre a face das lentes na câmera e o local de convergência da luminosidade do ambiente, denominado distância focal. Esta distância pode ser determinada através de uma relação trigonométrica de maneira experimental pela relação do ângulo de abertura de visão da lente e a distância do objeto filmado conforme citado por Sabino (2013). Conforme ilustrado na Figura 20, a distância focal é representada por h_{fs} , onde h representa a distância entre a cena observada e a face da lente da câmera, α representa o ângulo da abertura da lente e C_f representa o comprimento de abertura de visão.

Figura 20 – Princípio para determinação da distância focal da câmera.



Fonte: SABINO (2013, p.27).

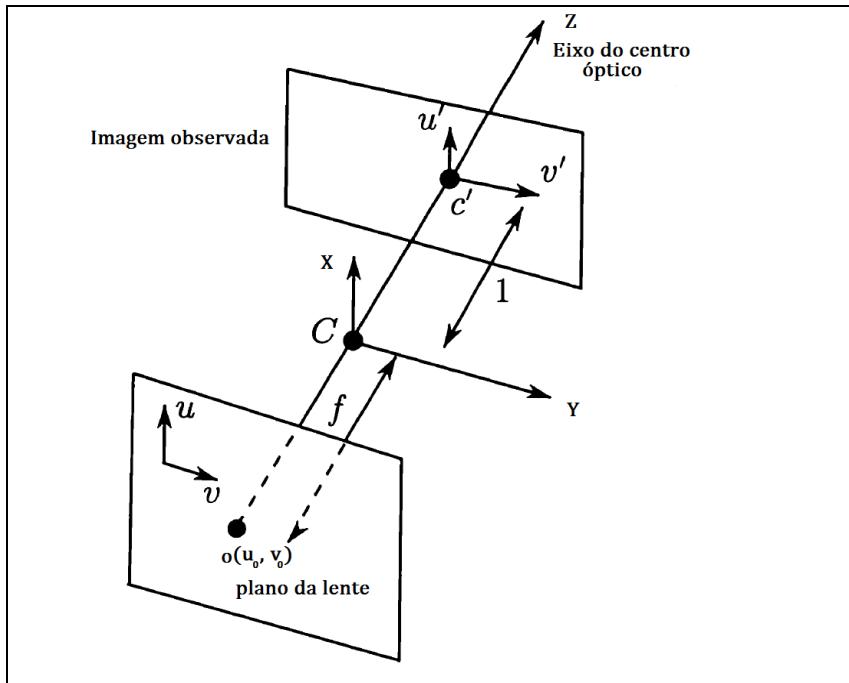
É possível encontrar a distância focal através da relação trigonométrica da Equação (11) de Sabino (2013):

$$h_{fs} = \frac{c_f - \tan(\alpha) \cdot h}{2 \cdot \tan(\alpha)} \quad (11)$$

A distância focal é necessária para o ajuste do centro da imagem projetada no plano da lente. Quando a imagem observada se desloca em relação ao eixo Z do sistema de coordenadas do espaço, e se desloca do centro óptico da lente para u_0 e v_0 conforme ilustrado na Figura 21, é necessária a correção através da matriz intrínseca $[M]$, definida através da Equação (12) de Faugeras (1993):

$$[M] = \begin{bmatrix} h_{fsu} & 0 & u_0 \\ 0 & h_{fsv} & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (12)$$

Figura 21 - Ajuste do centro da imagem no centro óptico da lente.



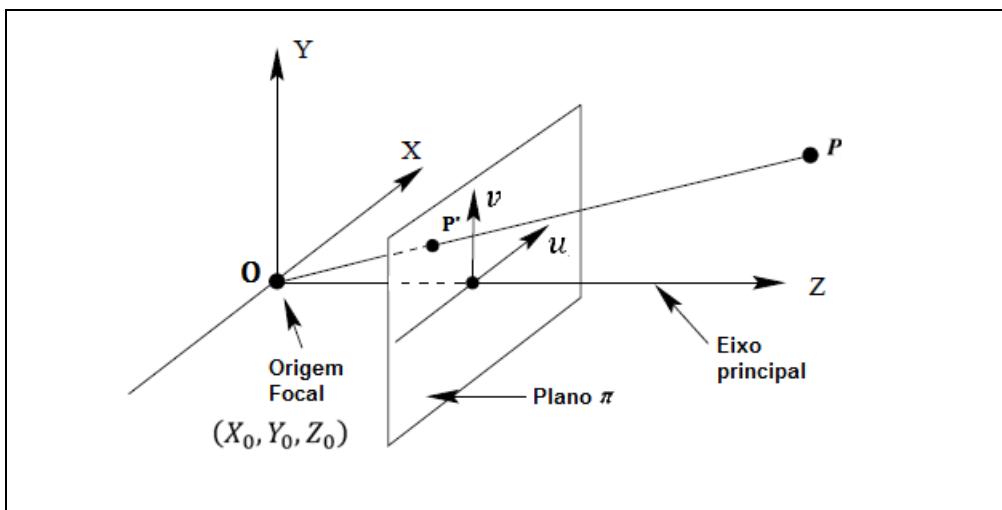
Fonte: Adaptado de Faugeras (1993).

Sendo u_0 e v_0 as coordenadas do centro da lente em unidade de pixels, h_{fsu} e h_{fsv} representam um fator de escala em função da distância focal para a mudança do sistema de coordenadas em unidade de mm.pixel.

3.2.2.2 Parâmetros Extrínsecos

Baseado no modelo “pinhole” de Hartley, Zisserman (2003), podemos definir uma Equação de transformação de coordenadas espaciais X, Y, Z para a coordenada da imagem formada no plano u, v na forma de imagem projetiva como ilustrado na Figura 22. Para isto é adotado como origem X_0, Y_0, Z_0 do sistema de coordenadas X, Y, Z a Origem focal O e o eixo Z como eixo perpendicular ao plano de projeção π , onde ponto P é projetado no ponto P' .

Figura 22 – Modelo “pinhole”



Fonte: Adaptado de Hartley, Zisserman (2003).

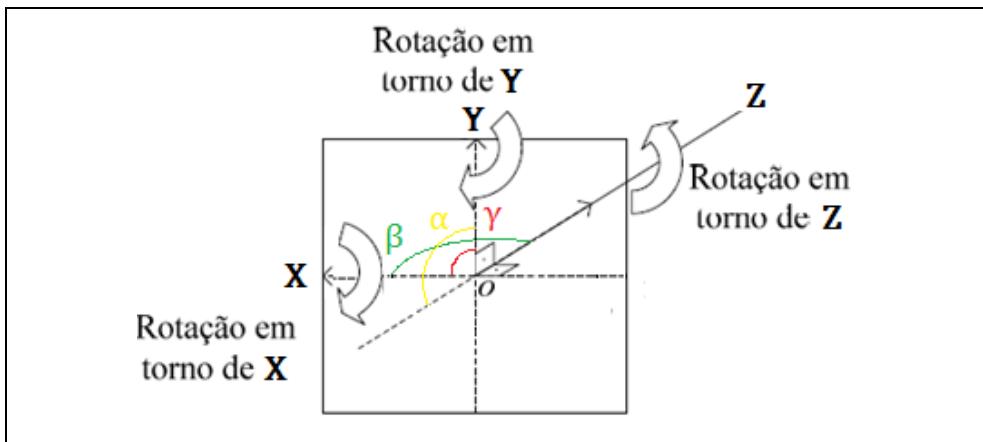
A matriz de rotação $[R]$ representa a correção da rotação da câmera caso ela esteja rotacionada em relação ao sistema de X, Y, Z , onde os ângulos formados são representados pela convenção dos ângulos de Euler em sequência α, β e γ (em torno do eixo X, Y e Z respectivamente pela regra da mão esquerda ilustrado Figura 23. A matriz de rotação pode ser expressa pela matriz $[R]$ de Heikkila e Silven (1997) dada pela Equação (13).

$$[R] = \begin{bmatrix} m_{11} & m_{12} & m_{13} \\ m_{21} & m_{22} & m_{23} \\ m_{31} & m_{32} & m_{33} \end{bmatrix} \quad (13)$$

Onde :

$$\begin{aligned}
 m_{12} &= \sin(\alpha)\sin(\beta)\cos(\gamma) - \cos(\alpha)\sin(\gamma) & m_{11} &= \cos(\beta)\cos(\gamma) \\
 m_{22} &= \sin(\alpha)\sin(\beta)\sin(\gamma) + \cos(\alpha)\cos(\gamma) & m_{21} &= \cos(\beta)\sin(\gamma) \\
 m_{13} &= \cos(\alpha)\sin(\beta)\cos(\gamma) + \sin(\alpha)\sin(\gamma) & m_{31} &= -\sin(\beta) \\
 m_{23} &= \cos(\alpha)\sin(\beta)\sin(\gamma) - \sin(\alpha)\cos(\gamma) & m_{32} &= \sin(\alpha)\cos(\beta) \\
 m_{33} &= \cos(\alpha)\cos(\beta)
 \end{aligned}$$

Figura 23 – Ângulos formados nos eixos X, Y e Z

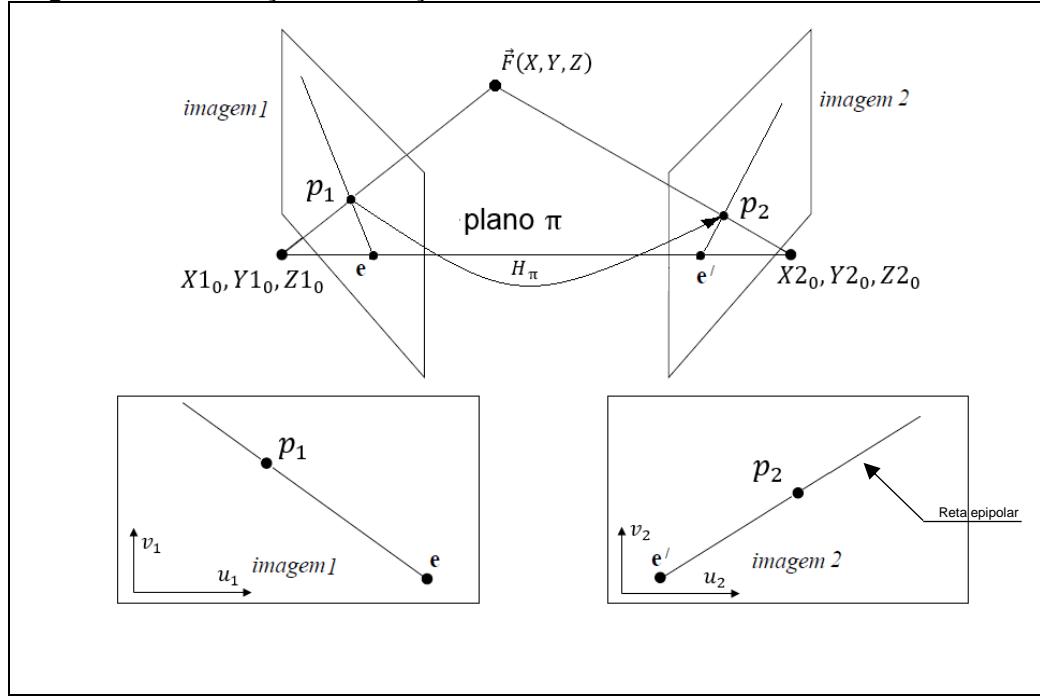


Fonte: Adaptado de Hartley, Zisserman (2003).

A matriz Fundamental $[F]$ da função $\hat{P}([F], p_1, p_2)$, relaciona os pontos p do par de imagens para o cálculo de um ponto no espaço X, Y, Z , determinado através de transformação linear direta baseado em teoria de geometria epipolar para corresponder aos pontos do par de imagens (BERTON JUNIOR, 2016). Para isto assumimos a condição de correspondência $p_1 \leftrightarrow p_2$ para um ponto P qualquer ser determinado pela triangulação linear. Desta forma podemos descrever uma equação $p_1 = H_\pi \times p_2$ onde H_π é chamado é a relação de transferência de uma imagem através de um plano π qualquer conforme ilustrado na Figura 24. Podemos estabelecer então esta relação através da Equação (14).

$$[e'] \times H_\pi \cdot p_2 = [F] \cdot p_2 \quad (14)$$

Figura 24 – Correlação da Posição dos centroides em cada frame



Fonte: Adaptado de Hartley e Zisserman (2003).

A matriz Fundamental $[F]$ é portanto descrita como $[F] = [e'] \times H_\pi$. Na forma geométrica, F representa a relação entre o plano projetivo da primeira imagem e o feixe de retas epipolares passando por e' . Desta forma a matriz fundamental representa um mapeamento do espaço projetivo bidimensional para o espaço projetivo unidimensional. Maiores informações aprofundadas do processo de obtenção da matriz fundamental podem ser encontrados no livro “Multiple View Geometry in Computer Vision” de Hartley e Zisserman (2003).

3.3 Pós Processamento de Imagem

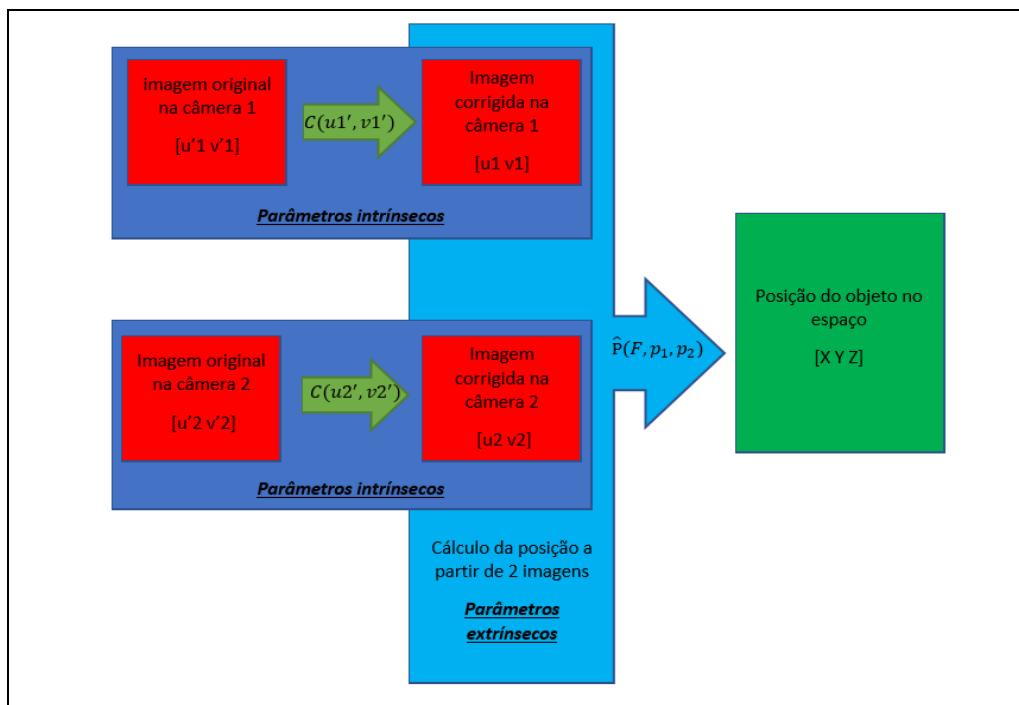
Segundo Marques (2011), o processamento de imagens tem como objetivo a interpretação e extração de informações presente em imagens. Este processo possui uma gama de aplicações nos setores da atividade humana, sendo alguns exemplos citados:

- Em aplicações industriais: aplicações em sistemas de segurança, controle de qualidade e aferição de medidas.

- Presente em aplicações médicas: Radiografia digital, equipamentos de tomografia, equipamentos de ressonância magnética digital, entre outras aplicações dotadas pela comunidade médica.
- No setor de segurança: reconhecimento biométrico, rosto, íris e reconhecimento de mãos.
- Em eletrodomésticos presentes no dia-a-dia: capacidade de renderização de imagem otimizada em televisões, eletrônicos portáteis de uso domésticos, smartphones e etc.
- Em entretenimento está presente em: elaboração de jogos e filmes.

De maneira análoga o processo de aferição de medidas a partir do processamento de imagens, reúne informações suficientes das imagens digitais, que permitem determinar a posição de um objeto no espaço X, Y, Z a partir da posição pontual do objeto no plano do par de imagens u_1, v_1 e u_2, v_2 . Também é necessário conhecimento dos parâmetros intrínsecos e extrínsecos das câmeras tais como a função de distorção de lentes C e uma função \hat{P} que relaciona o posicionamento do par de câmeras dado pela matriz Fundamental $[F]$ e o posicionamento \hat{p} do objeto no par de imagens, este processo é representado através do diagrama da Figura 25.

Figura 25 - Coordenadas u, v do par de planos para o espaço X, Y, Z .



Fonte: Autoria Própria.

A determinação da posição de um objeto no espaço a partir do par de imagens digitais sincronizadas é realizada por meio de triangulação pontual e quando realizado através do sistema de aquisição de imagens é necessária a aplicação de técnicas de processamento de imagens para a determinação da posição pontual do alvo nas imagens. Para isso esta seção discorre como são realizados os procedimentos do tratamento de dados para a determinação do deslocamento dinâmico a partir de correlação de imagens digitais, para que sejam obtidos os resultados esperados. A subseção 3.3.1 aborda como é realizado a correção da distorção de lentes em imagens digitais, na subseção 3.3.2 é apresentada a realização da separação dos alvos no par de imagens, a subseção 3.3.3 aborda a aplicação de um filtro de ruído para pequenos objetos, na subseção 3.3.4 é apresentada a determinação da posição dos alvos em uma organização lógica caso exista mais de um alvo a ser observado no par de imagens, na subseção 3.3.5 é apresentado a realização da correlação de imagens por meio de triangulação pontual e por fim na subseção 3.3.6 é apresentada o processo de reamostragem do sinal para taxa de aquisição não uniforme.

3.3.1 Correção da distorção de lentes

A busca do modelo matemático que soluciona o problema da distorção de imagem pode ser realizada de diferentes formas podendo ser citadas as mais usais, que são a utilização da transferência de posição conhecidas por meio da filmagem de pontos com a posição real conhecida e busca de correção por meio de métodos de otimização (XIAO, 2012) ou por meio de redes neurais calibrada por meio das medidas reais conhecidas e com os pontos obtidos através de uma câmera (OLIVEIRA, 2002).

As distorções em imagem capturada por uma câmera são oriundas da soma da combinação de distorções radiais e tangenciais (Wang, et al., 2006). Portanto torna-se necessário a correção da localização dos pixels observados na lente u', v' para um novo sistema de coordenadas u, v com a correção através de uma função C .

O modelo de distorção radial pode ser aproximado através de uma função a partir da série de expansão de Taylor cuja correção é determinada através da função C_r conforme Equação (15) conforme demonstrado por HEIKKILA e SILVEN (1997).

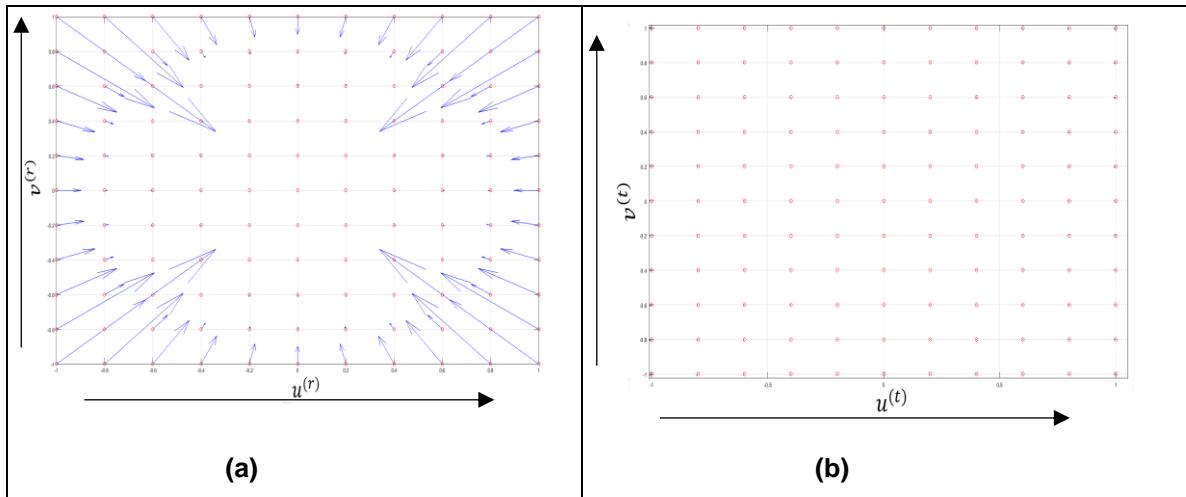
$$C_r(u', v') = \begin{cases} u^{(r)} \\ v^{(r)} \end{cases} = \begin{cases} u' \cdot (k_1 \cdot r_i^2 + k_2 \cdot r_i^4 + \dots + k_n \cdot r_i^{2n}) \\ v' \cdot (k_1 \cdot r_i^2 + k_2 \cdot r_i^4 + \dots + k_n \cdot r_i^{2n}) \end{cases} \quad (15)$$

Sendo $r_i = \sqrt{u'^2 + v'^2}$, e também é possível aproximar a correção da distorção tangencial C_t através dos coeficientes p_1, p_2 dado pela Equação (16):

$$C_t(u', v') = \begin{cases} u^{(t)} \\ v^{(t)} \end{cases} = \begin{cases} 2p_1 \cdot u' \cdot v' + p_2 \cdot (r_i^2 + 2 \cdot u'^2) \\ 2p_2 \cdot u' \cdot v' + p_1 \cdot (r_i^2 + 2 \cdot v'^2) \end{cases} \quad (16)$$

Na Figura 26 é possível observar um exemplo de distorções radiais em (a) e tangenciais em (b) da lente de uma câmera webcam Logitech C920 para $k_1=0,1255$, $k_2=-0,2332$, $p_1=-0,000069327$ e $p_2=0,0023$. Nota-se a distorção tangencial quase nula devido a alta precisão no processo de fabricação das lentes atualmente.

Figura 26 - Distorção de Lentes da Webcam Logitech C920 (a) Radial e (b) Tangencial.



Fonte: Autoria Própria.

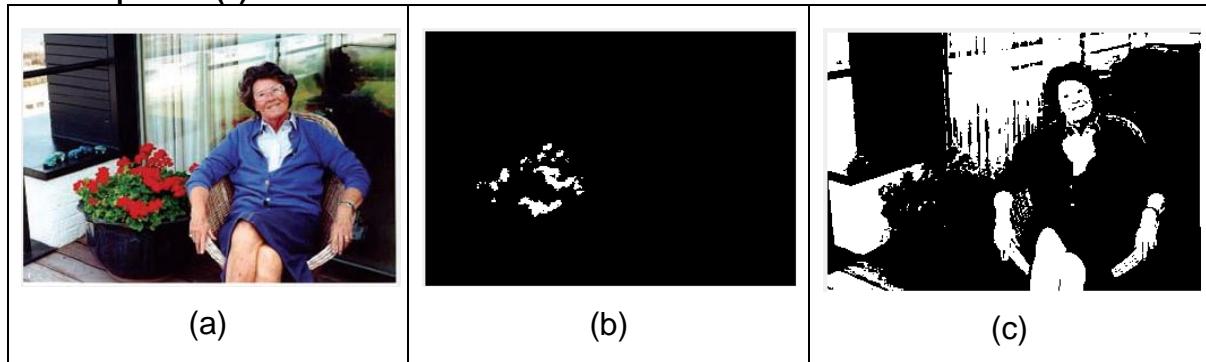
A função C da correção de distorções radiais e tangenciais resulta então em uma combinação de função que busca uma solução aproximada ao problema apresentada pela Equação (17):

$$C(u', v') = C_r(C_t(u^{(t)}, v^{(t)})) \quad (17)$$

3.3.2 Separação dos alvos do restante da imagem

A separação do alvo do restante da cena em uma imagem pode ser realizada por meio de identificação morfológica do alvo (DAVIES, 2012) ou ainda por meio de limiar de corte (thresholding) em uma imagem (KUMARI, 2015). A técnica através de limiar de corte de cor trata da aplicação de filtros de cor na cena por meio de filtros de cor em uma faixa proposta na imagem em escala de cinza ou ainda na escala RGB. Para ambas as escalas é necessário definir um limiar de corte para que seja realizada a separação do alvo e da cena (PINOLI, 2014). Um exemplo de aplicação de filtro de cor na escala RGB para a seleção de um objeto de interesse é apresentado no exemplo da Figura 27(a), quando aplicado para separação das rosas vermelhas na Figura 27 (b) nota-se que ele é bem eficiente quando a cor do alvo possui destaque na cena, contudo quando aplicado num objeto que possui uma variação de tonalidade semelhante a objetos na cena, o filtro de cor torna-se ineficaz conforme apresentado na Figura 27 (c) quando o filtro de cor é aplicado à pessoa.

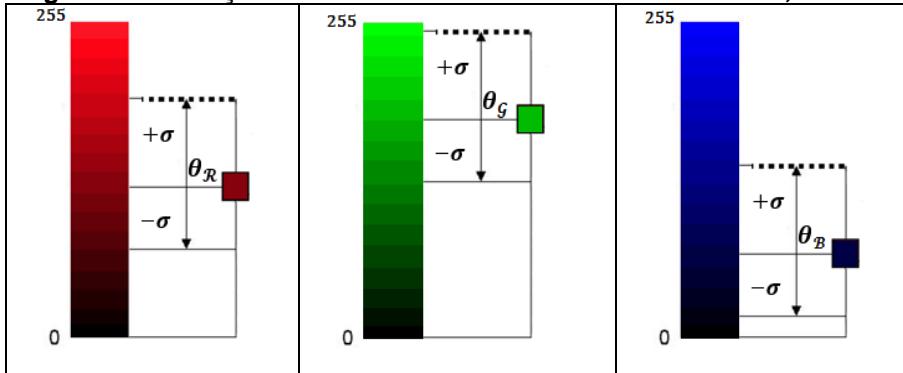
Figura 27 – (a) Imagem colorida, (b) separação da imagem das rosas e (c) identificação da pessoa (c).



Fonte: Adaptado de MARQUES, (2011).

A escolha da faixa de intensidade da cor de interesse para o limiar de corte (Color Thresholding) é definida selecionando um tom de cor θ_R , θ_G e θ_B como referência, onde a faixa de tolerância é definida pelo desvio padrão σ assim como o critério estocástico, inspirado no trabalho de Jesus e Costa (2015). Neste caso este desvio padrão σ é definido como tolerância das intensidades de cores como ilustrado na Figura 28.

Figura 28 – Seleção de uma intensidade de cor nos canais R, G e B.



Fonte: Autoria Própria.

Foi verificado experimentalmente que ao duplicar a tolerância no canal que apresenta maior intensidade de cor, o filtro torna-se mais eficiente para captura de objetos em movimento apresentando melhores resultados experimentais. A aplicação de (Color Tresholding) pelo critério de seleção de cor Gaussiana para cada uma das camadas de cores é apresentada através do Pseudocódigo apresentado abaixo.

Entrada: \bar{x} :cor com maior representatividade amostral do alvo na imagem (média)

Entrada: σ :define uma tolerância para a intensidade de cor (desvio padrão)

$(\theta_R, \theta_G, \theta_B) \leftarrow \bar{x}$; decomposição da cor em escala RGB

Função limiar (Thresholding)

identifica $\theta_{Máx} \in \max(\theta_R, \theta_G, \theta_B)$;

$\sigma_1 \leftarrow (\theta_{Máx} \pm 2 \cdot \sigma)$

$\sigma_2 \leftarrow (\theta_1 \pm \sigma)$

$\sigma_3 \leftarrow (\theta_2 \pm \sigma)$

$limiar \leftarrow (\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3)$; define a tolerância para o Limiar

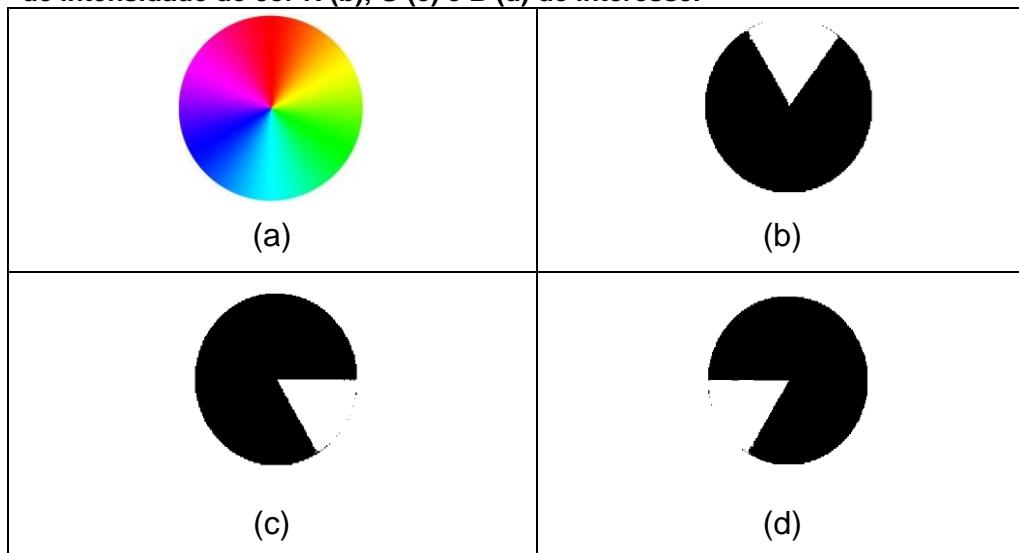
fim

Aplica **limiar** em $f(u, v)$

Fonte: Autoria própria.

Na Figura 29 é apresentada a eficácia do filtro de cor em um exemplo de uma imagem do gradiente de cores em escala RGB, sendo a Figura 29 (a) a imagem original, Figura 29 (b) a região vermelha tratado como alvo, Figura 29 (c) região verde tratado como alvo e Figura 29 (d) região azul tratado como alvo.

Figura 29 – Imagem colorida (a) e aplicação de filtro de cor através da seleção de intensidade de cor R (b), G (c) e B (d) de interesse.



Fonte: Autoria Própria.

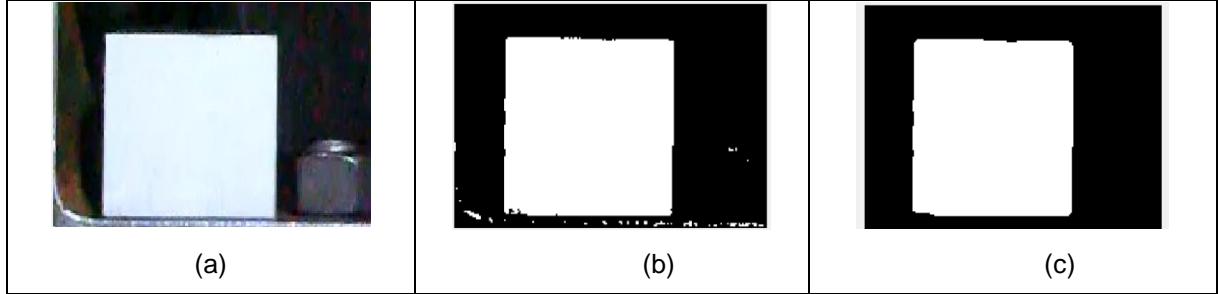
Desta forma o processo da separação do fundo utilizando filtro de cores possibilita subtrair o fundo da imagem desde que o alvo possua uma cor que seja diferente da cena, e por isso para cada realização experimental deve ser realizado um planejamento prévio para a determinação da cor para o alvo em movimento.

3.3.3 Filtro de ruído para pequenos objetos

Pequenas variações de cores na cena de uma imagem capturada considerados como ruídos podem passar através do filtro de cores na forma de alvos e devido a esse efeito deve ser aplicado um filtro para a remoção de pequenos objetos detectados na imagem.

Através da toolbox de processamento de imagem do software MATLAB (Image Processing Toolbox) é possível aplicar um filtro de aglomeração por vizinhança através do comando denominado “bwareaopen”, onde os parâmetros de entrada necessários para utilização desta ferramenta é uma imagem binária (resultado da aplicação de uma limiarização) e a quantidade máxima de pixels aglomerados a ser filtrado, e o critério de remoção considera uma quantidade máxima de pixels aglomerados para a remoção. No exemplo da Figura 30 (a) é aplicação filtro de cores resultando na Figura 30 (b) e através do comando é mostrado o resultado da remoção dos ruídos na Figura 30 (c).

Figura 30 – Imagem original (a), aplicação de limiarização para separação de um objeto (b), aplicação do filtro de remoção para pequenos objetos (c).



Fonte: Autoria Própria.

3.3.4 Identificação e organização dos centróides de cada alvo

O reconhecimento da quantidade de alvos é realizado pela quantidade de pixels válidos (pixels brancos) aglomerados na imagem binária. A posição pontual de um objeto que ocupa determinada área em uma imagem binarizada pode ser definida como o centróide da região ocupada pelo objeto binário conforme descrito no trabalho de Rissá (2017). O cálculo do centro geométrico é determinado computacionalmente pela Equação (18) na forma numérica.

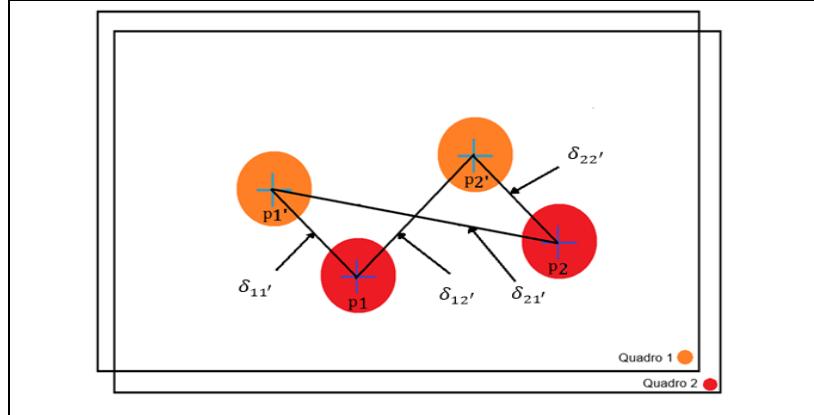
$$u_c = \frac{\sum_{i=1}^n u_i}{d u_n}, v_c = \frac{\sum_{i=1}^n v_i}{d v_n} \quad (18)$$

Onde u_c e v_c representam a posição do centróide do alvo \hat{p} calculado no plano da imagem, u_i e v_i representa as coordenadas de pixels válidos reconhecidos na imagem binária e por fim $d u_n$ e $d v_n$ representa a capacidade de discretização máxima em pixels da imagem.

A indexação dos alvos é responsável por organizar as informações de posição de um único alvo ou de vários ao mesmo tempo, desta forma a posição pode ser definida como o centróide de um objeto localizado na imagem no plano u, v (SCURI, 1999) na forma binária.

O método proposto para esta organização de uma quantidade qualquer de alvos consiste em determinar um índice inicial em cada alvo e manter seu índice baseado na menor posição do alvo em relação aos outros alvos do quadro anterior. De maneira ilustrativa mostrada na Figura 31.

Figura 31 – Determinação da organização dos alvos



Fonte: Autoria Própria.

Conforme o exemplo da Figura 31, a partir do alvo p_1 do Quadro 2 é calculado as distâncias $\delta_{11'}$ e $\delta_{12'}$ em relação ao centróide do alvo p_1' e p_2' do Quadro 1 anterior. De forma análoga, o alvo p_2 calcula as distâncias $\delta_{21'}$ e $\delta_{22'}$ em relação ao centroide do alvo p_1' e p_2' do Quadro 1 anterior. O alvo permanecerá com o mesmo endereço se este possuir a menor distância calculada.

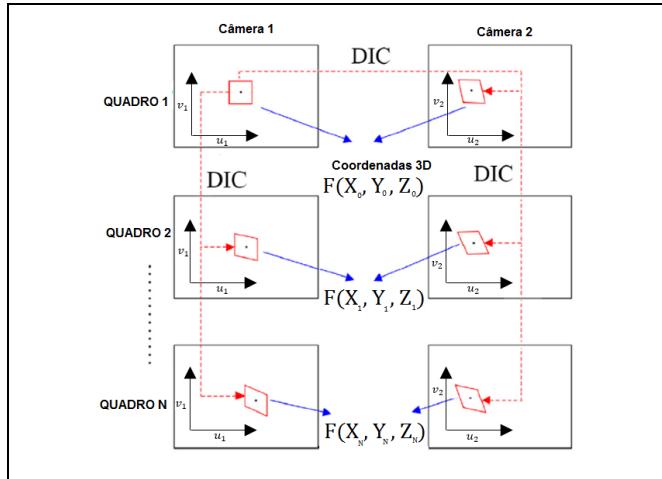
3.3.5 Correlação de Imagem

A obtenção do cálculo de posição do objeto no espaço X, Y, Z a partir de um par de imagens discrete (planos u_1, v_1 e u_2, v_2) de perspectivas diferentes e são estimados através da aproximação de uma função $\hat{P}(F, p_1, p_2)$ que depende da localização de um ponto p em cada plano da imagem e da matriz $[F]$ apresentada na equação 10.

A função $\hat{P}([F], p_1, p_2)$ da posição através da observação do movimento de um ponto no espaço de dimensões X, Y, Z do ponto de vista de duas câmeras em um número N de imagens é denominado Correlação de Imagem digital (3D Digital Image Correlation – 3D DIC) e pode ser realizado por triangulação para o caso de um par de imagens), como ilustrado Figura 32, proposto pelo modelo analítico inverso da observação de uma imagem apresentado no trabalho de Hartley e Zisserman (2003), representado pela Função (19).

$$\hat{P}([F], p_1, p_2) = [X \ Y \ Z] \quad (19)$$

Figura 32 – Correlação da Posição dos centroides em cada frame



Fonte: Xue, 2017 (adaptado).

A triangulação é uma ferramenta disponível no software MATLAB, que pode ser aplicada quando conhecido a localização dos planos corrigidos onde a imagem se forma u_1, v_1 e u_2, v_2 e um par de pontos correspondentes p_1 e p_2 que satisfazem a condição de correspondência $p_1^T \times F \cdot p_2 = 0$. O ponto P da localização do objeto reprojetoado no espaço X, Y, Z é obtido através do uso da Equação (20) de Hartley e Zisserman (2003):

$$A = \begin{bmatrix} u_1 \cdot h_F^{3T} - h_F^{1T} \\ v_1 \cdot h_F^{3T} - h_F^{2T} \\ u_2 \cdot h_F^{3T} - h_F^{1T} \\ v_2 \cdot h_F^{3T} - h_F^{2T} \end{bmatrix} \quad (20)$$

Onde A é um sistema de 4 equações homogêneas e o vetor de deslocamento no espaço X, Y, Z é obtido através da última coluna da base ortogonal singular, representado por S quando a decomposição é realizada na forma da Equação (21).

$$B \cdot d \cdot S^T = A \quad (21)$$

Onde B e S são as matrizes ortonormais e d é uma matriz diagonal na forma de fator de escala.

3.3.6 Reamostragem do sinal obtido

A não uniformidade de taxa de aquisição de imagens torna necessário realizar um processo de reconstrução de sinal através do processo de interpolação para permitir a realização do tratamento adequado dos dados amostrais para obtenção do espectro de frequência. A reconstrução do sinal de deslocamento dinâmico é reamostrado através do comando “*resample*” do software MATLAB com método para interpolação do tipo “*Spline*”. Trata-se de uma interpolação cúbica descrita no trabalho de De Boor (1978) onde verificou se que esta aproximação é um método de interpolação eficiente para deslocamentos senoidais impostos, contudo mais estudos sobre o método devem ser realizados para verificar a eficiência do tratamento de sinal experimentalmente.

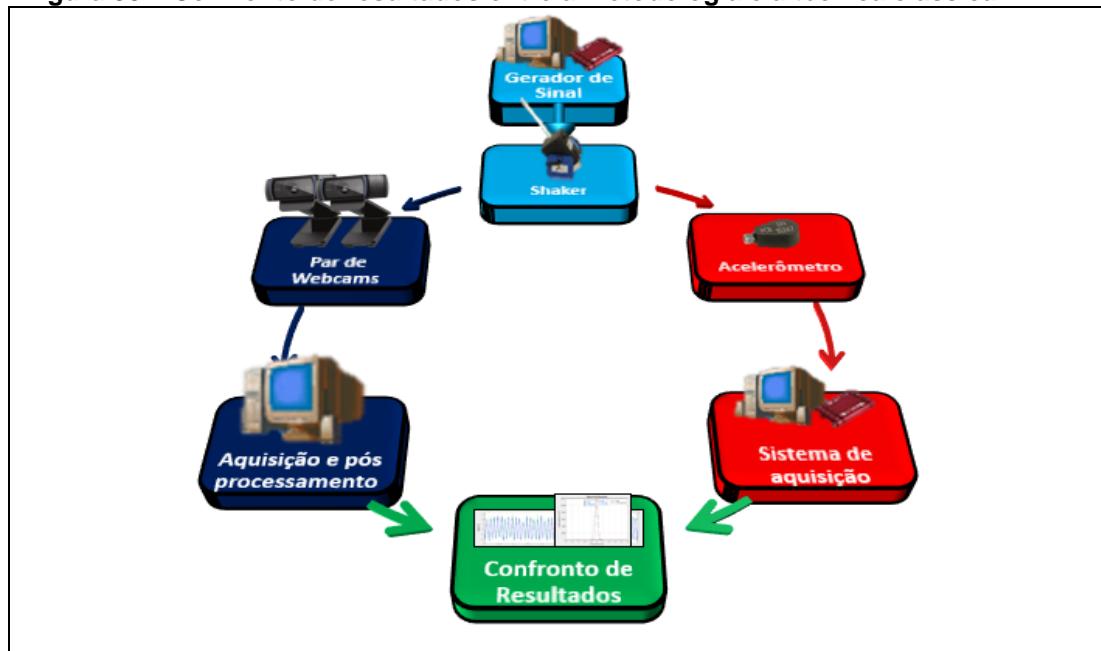
Para Andrade e Soares (2002) o janelamento de sinais aumenta as características do sinal amostrado em aplicações práticas envolvendo formas de ondas truncadas e características espetrais diferentes do sinal original resultando em perdas de informações. Assim a aplicação da janela do sinal no domínio do tempo é equivalente a multiplicar o sinal pela função que representa a janela. Para o monitoramento de deslocamentos periódicos é aplicado janelamento “*Hanning*” pois é ideal para análises transientes no qual o tempo de duração é maior que o tempo de duração da janela.

O período de aquisição em quadros por segundo está relacionado com a capacidade de aquisição do equipamento de vídeo para que a frequência de movimento do objeto seja analisada. Caso a taxa de captura dos quadros não atenda ao critério de amostragem de Nyquist, no mínimo duas vezes maior que a frequência de operação do equipamento em estudo, a aquisição é comprometida (OPPENHEIM; WILLSKY e NAWAB, 1997), por isso a aplicação de um filtro passa alta com banda de até metade da frequência de aquisição torna-se necessário, com o objetivo de evitar efeitos de *aliasing* na análise do espectro de frequência.

4 PROCEDIMENTO METODOLÓGICO

O presente trabalho desenvolvido no âmbito do Laboratório Tecnológico de Vibrações e Manutenção Mecânica (LTVM) da Universidade Tecnológica Federal do Paraná tem como objetivo avaliar a medição de deslocamentos dinâmicos a partir do processamento e correlação de imagens digitais de um alvo em movimento, capturadas utilizando um par de webcams (ou par de câmeras). Em um primeiro momento os dados de deslocamento da haste de um Shaker, vibrando a baixa frequência serão capturados por um par de webcams, onde o principal interesse é a correta captura da frequência de oscilação imposta e amplitude do deslocamento imposto na haste através de um gerador de sinais. Tal procedimento será utilizado para avaliar a presente implementação de captura de imagens estéreo, e pós-processamento de imagens por meio do par de câmeras. Os resultados obtidos serão discutidos por meio da comparação do espectro de frequência de deslocamentos dinâmicos pela técnica apresentada e o método convencional utilizando acelerômetro e placa de aquisição com software vendidos comercialmente, conforme representado na Figura 33. O presente código de aquisição e pós-processamento foi implementado em ambiente MATLAB e é uma das principais contribuições associadas ao presente trabalho.

Figura 33 – Confronto de resultados entre a metodologia e a técnica clássica.



Fonte: Autoria Própria.

Nos experimentos apresentados foram utilizados: notebook, um par de webcams Logitech C920, um atuador eletromecânico modelo K2007E01 em conjunto com gerador de sinal Quattro e um acelerômetro PCB Piezotronics modelo 352C22; cujas especificações técnicas são descritas no Quadro 3.

Quadro 3 – Especificações de Hardware do sistema de aquisição de imagens experimental.

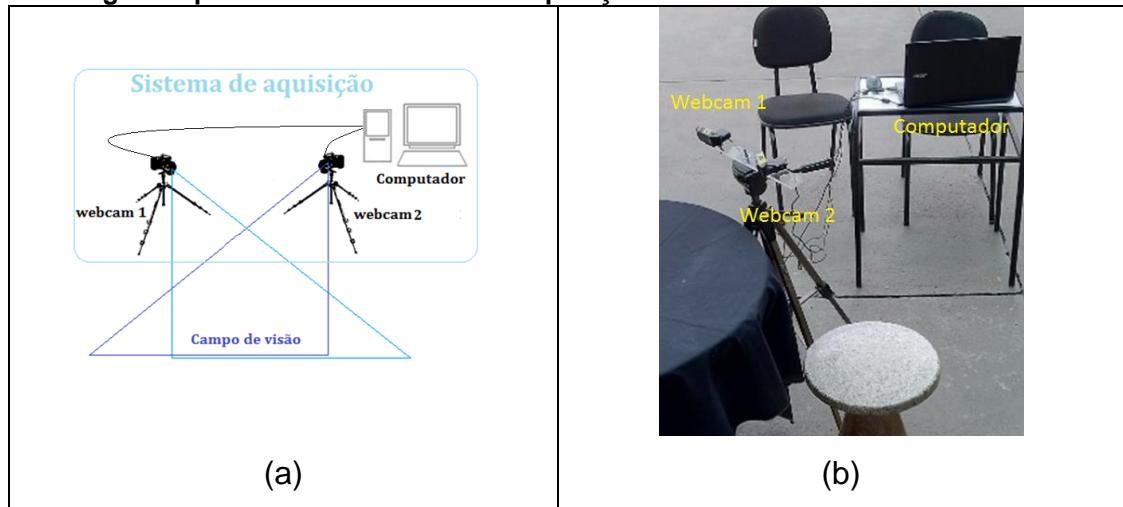
Itens	Componente	Especificação
Computador	Marca/Modelo	Acer modelo e1-572-6_br648
	RAM	4 GB/DDR3L SDRAM
	Processador	Intel Core i5 (4th Gen) 4200U
Webcams	Marca	Logitech C920
	Sensor	CMOS
	Taxa de captura	Até 30 quadros por segundo (30 Fps)
Shaker Eletromecânico	Marca/Modelo	Modal Shop - K2007E01
	Faixa de operação segura	CC até 3 kHz
	Deslocamento Máximo	13mm (pico a pico)
Leitor/Gerador de Sinal	Marca/Modelo	Quattro – Data Physics
	Entradas/Saídas	4 entradas/ 2 saídas
	Tensão máxima de entrada	0,1; 1,0; 10,0 Volts (configurável)
	Taxa de aquisição máxima	204,8 kHz
	Tensão Máxima de saída	10 Volts
Acelerômetro	Marca/Modelo	PCB Piezotronics - 352C22
	Direções de leitura	Uniaxial
	Faixa de leitura	2 Hz a 10 kHz (2,5% de incerteza)

Fonte: Autoria Própria.

A montagem experimental do sistema de aquisição proposto, inicia com a fixação do par de câmeras em um pedestal, a fim de manter o seu posicionamento e contemplar toda a extensão do movimento do objeto ao qual se deseja adquirir, conforme representação na Figura 34 (a). O notebook ligado ao par de câmeras é responsável pelo processo de aquisição de imagens, armazenamento e processamento de dados coletados, por meio do algoritmo implementado em ambiente MATLAB, no qual tem como principal característica o controle de aquisição de imagens de forma síncrona, calibração de câmeras e pós-processamento,

conforme discutido na seção 3.1. O sistema experimental montado é apresentado na Figura 34 (b).

Figura 34 – (a) Representação da montagem do sistema de aquisição de imagem e (b) Montagem experimental do sistema de aquisição



Fonte: Autoria Própria.

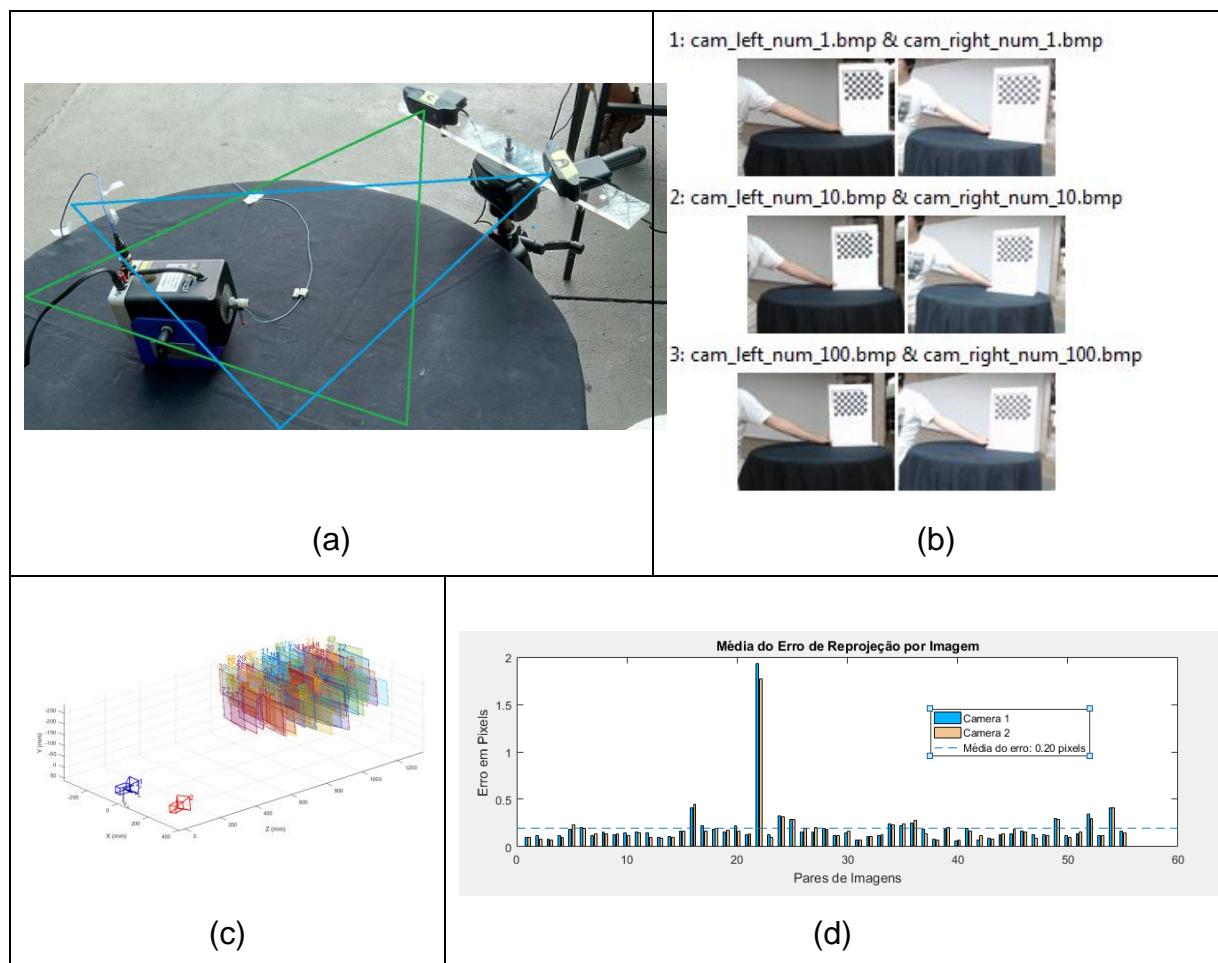
Após a montagem experimental as câmeras são calibradas, por meio da identificação de suas propriedades físicas. Estes procedimentos são realizados através toolbox “Stereo Camera Calibrator”, conforme discutido no trabalho de Bouguet (2018) apresentado na seção 3.2.

A sub-rotina de calibração permite calcular as propriedades do par de câmeras, a partir da extração de informações de uma sucessão de imagens de um padrão em forma de tabuleiro. O posicionamento da sucessão de imagens obtidas do padrão geométrico também é definido dentro do espaço tridimensional de movimento do objeto monitorado, conforme evidenciado na Figura 35 (a). Já na Figura 35 (b) são mostradas alguma imagens capturadas pelo sistema estéreo de câmeras. E, através do processamento das imagens do padrão em diferentes posições obtém-se a nuvem de pontos pelo algoritmo, conforme mostrado na Figura 35 (c). O Critério de parada do método de otimização, para encontrar os parâmetros da caracterização, é realizada através de um erro máximo de reprojeção obtidos através das Equações 9 e 10 sendo denominado como ε . Nos experimentos apresentados para este processo de calibração é considerado critério de parada o erro médio de 0,2 pixels conforme o exemplo de calibração ilustrado na Figura 35 (c).

Após a obtenção da nuvem de pontos, são calculados os parâmetros intrínsecos e extrínsecos, podendo ser citados como exemplo a distância focal,

resolução, distorção radial e posicionamento das câmeras, respectivamente. Na Figura 35 (d) é apresentado o gráfico de erro de reprojeção dos parâmetros estimados. Os parâmetros obtidos neste procedimento são apresentados com maiores detalhes na Seção 3.2.

Figura 35 – Posicionamento do padrão em forma de tabuleiro (a), algumas amostras da sucessão de fotos do padrão obtidas pelo par de webcams (b), nuvens dos pontos identificados (c) e erros de reprojeção calculado pela toolbox (d).



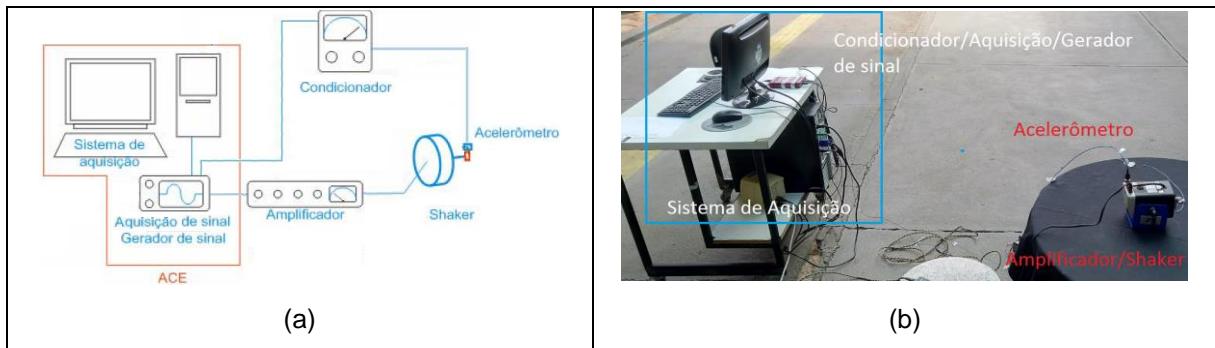
Fonte: Autoria Própria.

Ao final do procedimento de calibração são obtidos os parâmetros de correlação entre as câmeras, como matriz de rotação, translação e fundamental, conforme discutido na seção 3.2.

Fez-se uso de um atuador eletromecânico (Shaker) e um sistema de aquisição/geração de sinais configurado a partir do software comercial Signal Calc Ace. O software permite que sejam geradas diversos sinais, como ondas senoidais, quadradas, cujas frequências podem ser geradas em até 23,5kHz, e a amplitude

máxima de 10 Volts, além de ruídos de diferente bandas e impulsos. No presente trabalho optou-se por utilizar uma onda senoidal de frequência definida para provocar o deslocamento controlado de uma haste. O fluxograma do aparato experimental, assim como a montagem experimental são mostrados nas Figura 36 (a) e (b) respectivamente.

Figura 36 – (a) Representação da montagem do Shaker e (b) Montagem experimental.



Fonte: Autoria Própria.

Assim, o sistema gerador de sinais é acionado e a aquisição de imagens iniciada. As imagens são adquiridas através do algoritmo desenvolvido para a aquisição de imagens. O algoritmo de aquisição é responsável por acionar simultaneamente as webcams, definir a resolução das imagens, assim como seu foco e a taxa de aquisição. Os dados coletados, temporariamente são armazenadas no Workspace (memória RAM) durante o tempo total de aquisição do vídeo, e ao final, são armazenadas na memória permanente (Disco Rígido) conforme apresentado na seção 3.1. Destaca-se que o algoritmo, acima citado, foi desenvolvido no decorrer do trabalho e inteiramente desenvolvido pelo autor. Maiores informações sobre a metodologia de aquisição podem ser encontradas no fluxograma mostrada na parte A da Figura 1, na qual foram detalhadas tanto as etapas de aquisição como calibração no decorrer das seções 3.1 e 3.2.

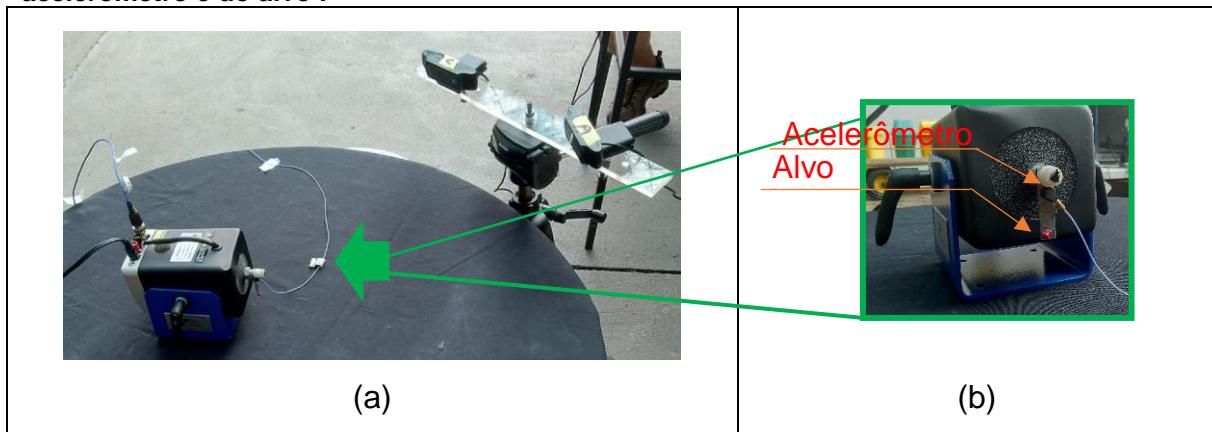
Ressalta-se ainda que, nesta etapa deve-se levar em consideração alguns fatores envolvidos na aquisição de dados. Um dos principais é a resolução máxima das imagens, associada à sua taxa de aquisição em frames por segundo. Esta propriedade é determinada conforme a limitação do modelo de webcams utilizadas. Além disso a capacidade de aquisição pode ser limitada de acordo com a capacidade de processamento de informações de cada computador. No presente experimento o período de aquisição em quadros por segundo está relacionado com a capacidade de aquisição do equipamento de vídeo para que a frequência de movimento do objeto

seja analisada. Deste modo, caso a taxa de captura dos quadros não atenda ao critério de amostragem de Nyquist, no mínimo duas vezes maior que a frequência de operação do equipamento em estudo, a aquisição é comprometida.

A precisão de medição dependerá diretamente da resolução da imagem em pixels em consequência da identificação da posição do alvo através de seu centroide de área na imagem conforme já exposto na seção 3.3.4. Além disso, no Método proposto por Zhang (2000) para determinação da distorção de lentes, matriz de rotação e translação do par de câmeras são determinados pelo método de otimização gradiente descendente com critério de parada de erro de reprojeção de no máximo 0,2 pixels, ou seja, 20% do menor deslocamento observado pelas câmeras.

Em relação ao alvo, foi definido como um ponto vermelho posicionado em uma haste metálica rígida acoplada ao Shaker, Figura 37 (a). Na Figura 37 (b) são mostrados em detalhes os posicionamentos do alvo e do acelerômetro. Destaca-se que o acelerômetro foi posicionado também na haste, para a captura do movimento oscilatório do Shaker. Ao final desta etapa, as imagens capturadas pelo par estéreo de câmeras foram armazenadas pelo algoritmo de aquisição. E os sinais capturados pelo acelerômetro foram processadas pelo software Signal Calc Ace, e devidamente armazenado para posterior comparação.

Figura 37 – Execução experimental em: (a) Vista Frontal e (b) Detalhe do posicionamento do acelerômetro e do alvo .



Fonte: Autoria própria.

Após a captura do movimento do alvo, a presente metodologia de processamento de imagens, desenvolvida pelo autor, conforme evidenciado na parte B do fluxograma mostrada na Figura 1, realiza os procedimentos identificados na seção 3.3. No qual pode-se elencar as etapas de correção e distorção da lente;

separação do alvo da cena; filtro de ruídos; identificação e organização dos centróides de cada alvo; correlação de imagem e tratamento do sinal obtido, dispostas nas seções 3.3.1-3.3.6, respectivamente.

Dentre as etapas citadas acima, pode-se destacar o processo de separação do alvo em relação a cena, através do filtro de cor citado na seção 3.3.2, onde uma amostra de cores do alvo é utilizada para determinar o limiar (Thresholding) e utiliza-se o desvio padrão amostral de cores na forma de tolerância σ e como resultado obtém-se a Figura 38 (b) a partir da perspectiva de visão cada câmera mostrada na Figura 38 (a).

Figura 38 – Tratamento de imagens Captura do deslocamento (a) na haste na câmera esquerda e (b) aplicação do filtro de cor.



Fonte: Autoria própria.

Após a determinação do centróide do alvo, a posição do objeto no espaço tridimensional é determinada por meio de triangulação linear descrito no trabalho Hartley e Zisserman (2003) na subseção 3.3.5.

É importante ressaltar que, o deslocamento da haste pode ser capturado com a utilização de apenas uma câmera, caso o posicionamento da haste estiver no plano bidimensional da mesma, entretanto, optou-se por posicionar o Shaker de tal forma que, a projeção do deslocamento da haste fosse capturada simultaneamente por ambas as câmeras e que seu deslocamento total, portanto, seja a soma vetorial dessas projeções (deslocamento euclidiano). Tal procedimento experimental permitiu avaliar quantitativamente a metodologia de aquisição de dados.

5 RESULTADOS

No presente capítulo serão descritos os resultados da avaliação de duas etapas da metodologia proposta para validação da medição de deslocamentos dinâmicos a partir do processamento e correlação de imagens digitais de um alvo em movimento, comparando os resultados alcançados e os obtidos com a técnica clássica em dois experimentos.

No primeiro experimento serão avaliados os resultados com a alteração dos coeficientes característicos do par de câmeras determinados através do aumento progressivo da quantidade de fotos adquiridas na etapa de calibração. Isto se faz necessário pois a caracterização inadequada de propriedades intrínsecas e extrínsecas das câmeras podem ocasionar erro sistêmico de discretização espacial, comprometendo a leitura de medidas dinâmicas, observável no resultado da leitura de frequências em torno da frequência de interesse ou pelo deslocamento do pico em frequência do alvo. Além disso possui também o intuito de verificar a influência da quantidade de fotos necessárias na etapa de calibração para que se obtenha uma melhor aproximação dos parâmetros de caracterização do par de câmeras.

O segundo experimento consiste na comparação dos resultados obtidos pela técnica apresentada em comparação com a técnica clássica realizando a variação da frequência do deslocamento da haste do Shaker.

As avaliações de ambos experimentos foram realizadas com a sobreposição dos picos de frequência identificadas no espectro de frequência com a leitura do deslocamento periódico imposto na haste do Shaker, confrontando com o resultado obtido com o uso de acelerômetro.

5.1 Experimento 1 – Variação de quantidade de fotos para caracterização do par de câmeras

O presente procedimento experimental tem como objetivo exibir resultados de deslocamento de uma haste fixada ao Shaker eletromagnético, em que somente será alterado o número de fotos necessárias para realizar a caracterização do par de câmeras através do método de Zhang (2000), por meio da utilização de sub-rotinas disponível no software comercial MATLAB para deslocamentos dinâmicos. A calibração foi realizada com amostras de 10, 25, 50, 100 e 200 pares de fotos do

padrão em forma de tabuleiro contendo 36 pontos em cada foto para alimentação da nuvem de pontos para calibração do par de câmeras, com espaçamento de cada alvo de 23,08mm, podendo assim ser estimado os coeficientes de cada parâmetro característicos necessários conforme descritos na seção 3.2.2.

Durante o processo de identificação de alvos existe a possibilidade da toolbox rejeitar um par de fotos quando não se identifica o formato do padrão em ambos os pares de imagens. Assim em cada processo de calibração, haverá uma quantidade efetiva de fotos menor ou igual a quantidade de foto adquiridas, e utilizadas no processo de cálculo da caracterização do par de câmeras.

A quantidade de fotos utilizadas efetivamente para caracterização do par de câmeras a partir do padrão neste experimento é apresentada no Quadro 4 com a sua respectiva entrada de pontos para o processo de busca dos coeficientes através do método de otimização conforme descrito na seção 3.2.

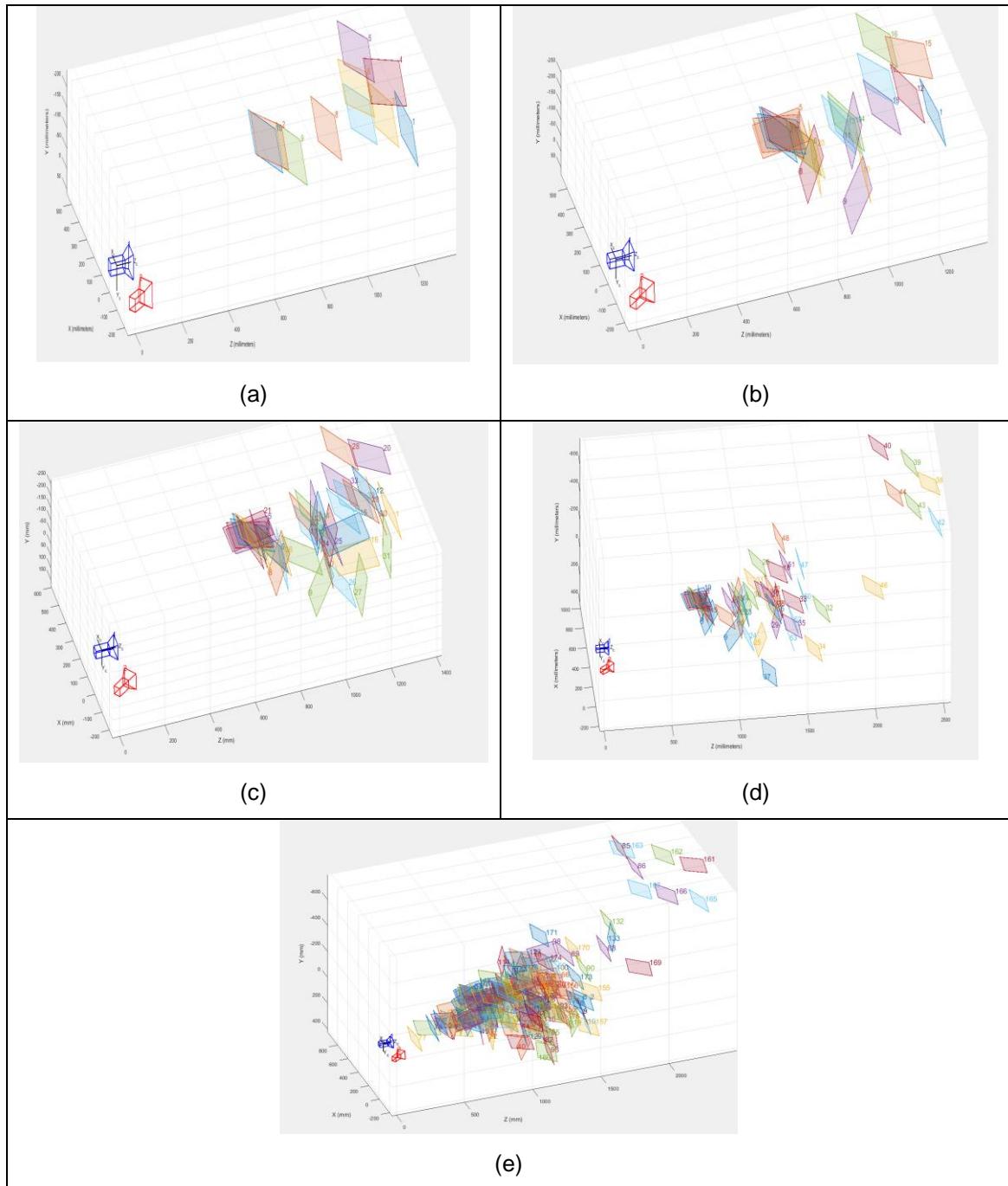
Quadro 4 – Quantidade de fotos utilizadas para caracterização das câmeras.

Quantidade de fotos adquiridos	Quantidade de fotos aceitas	Porcentual Efetivo para Caracterização	Quantidade de Pontos
10	10	100%	360
25	21	84%	756
50	37	74%	1332
100	55	55%	1980
200	177	89%	6372

Fonte: Autoria Própria.

Na Figura 39 são mostrados com mais detalhes os posicionamentos do padrão identificado pela ferramenta de calibração. Os coeficientes numéricos respectivo à caracterização obtida pelo par de câmeras através da metodologia são apresentados no APÊNDICE A – Caracterização de câmeras do Experimento 1, Quadro 7 ao Quadro 11 para as respectivas amostras de 10, 25, 50, 100 e 200 fotos.

Figura 39 – Posicionamento do padrão no processo de calibração com (a) 10 fotos, (b) 25 fotos, (c) 50 fotos, (d) 100 fotos e (e) 200 fotos.



Fonte: Autoria própria.

Esta metodologia é avaliada de maneira quantitativa com a leitura da amplitude e frequência da aceleração do deslocamento da haste de um Shaker, vibrando a baixa frequência e a leitura através de acelerômetro e placa de aquisição. O movimento capturado pelas câmeras tem resolução de 640x480 pixels, tempo de

vídeo amostral de 33,234 segundos e 998 frames obtendo assim, a taxa média de aquisição de 30,029 frames por segundo.

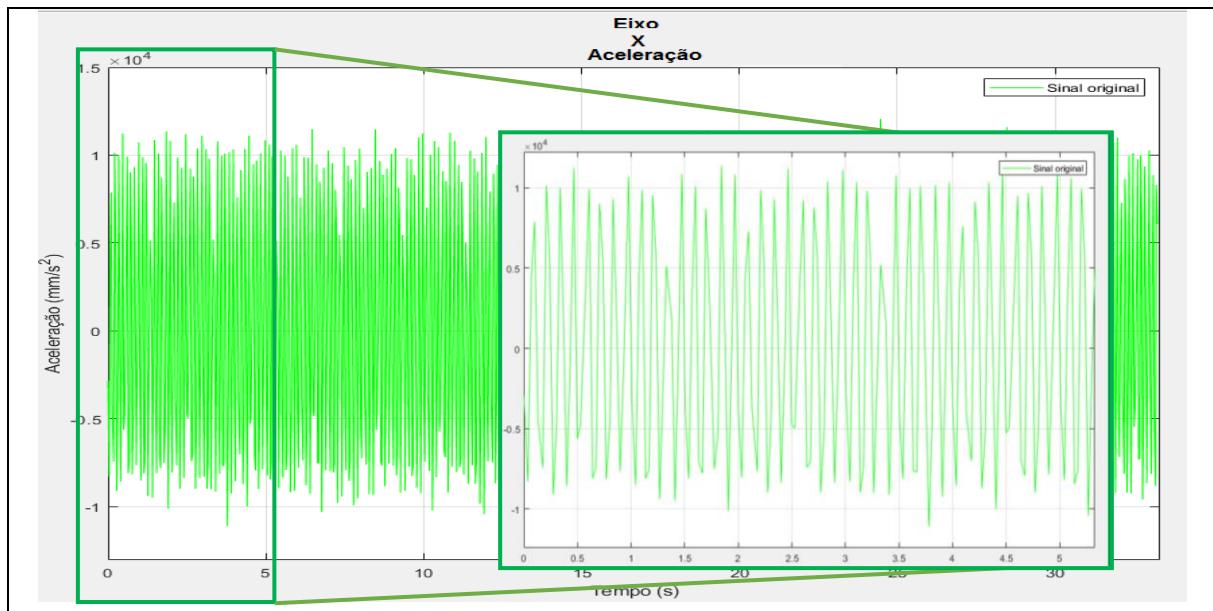
O acelerômetro utilizado para captura de dados de comparação como base de referência para este experimento trata-se de um acelerômetro unidirecional de sensibilidade 10,98 mV/G da marca PCB Piezotronics onde a banda de frequência foi de 0 até 15,6 Hz contendo 2048 linhas espectrais, resultando em resolução em frequência de 0,007 Hz.

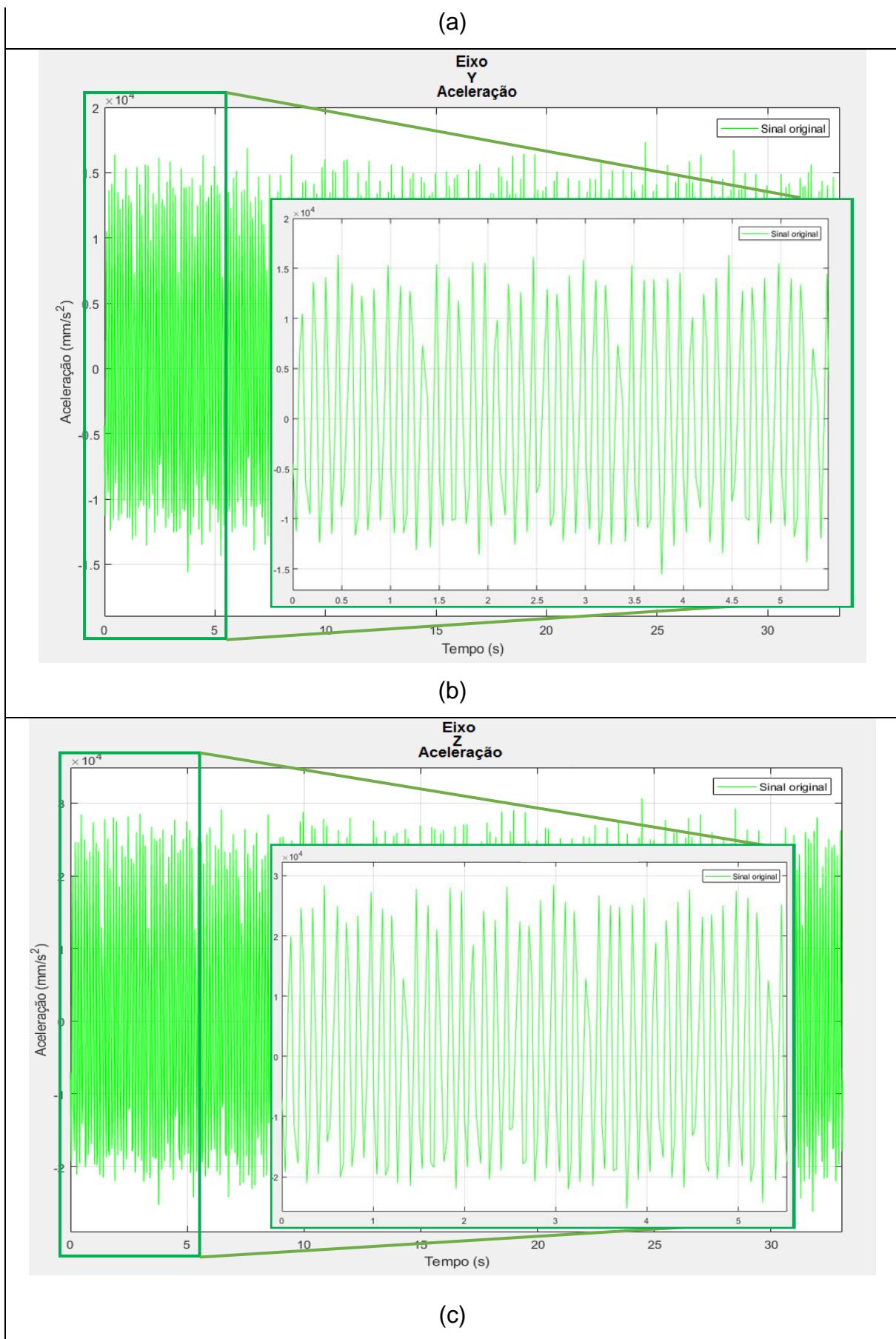
Os dados adquiridos por meio do processamento das imagens do vídeo permitiram estimar os sinais de aceleração em três dimensões. Entretanto, na presente metodologia foram considerados apenas o deslocamento euclidiano (absoluto) para posterior comparação com os resultados de aceleração no domínio da frequência com as medidas obtidas pelo acelerômetro uniaxial (uma dimensão). Desta forma, apenas como caráter ilustrativo, optou-se por mostrar os resultados dos deslocamentos organizados nas Figura 40 (a)-(c) nos três eixos X, Y e Z, respectivamente, para o sistema calibrado a partir de 100 amostras.

Vale ressaltar ainda que, para critérios comparativos foi realizada a norma euclidiana dos 3 eixos de deslocamento e posteriormente realizado a derivação discreta em relação ao tempo conforme exemplo demonstrados nas Figura 40 (a)-(c), resultando nos gráfico da subsequentes da

Figura 41 conforme será explicado.

Figura 40 – Deslocamento do alvo no eixo X (a), deslocamento do alvo no eixo Y (b) e deslocamento no eixo Z (c) calculados a partir da calibração de 100 fotos.



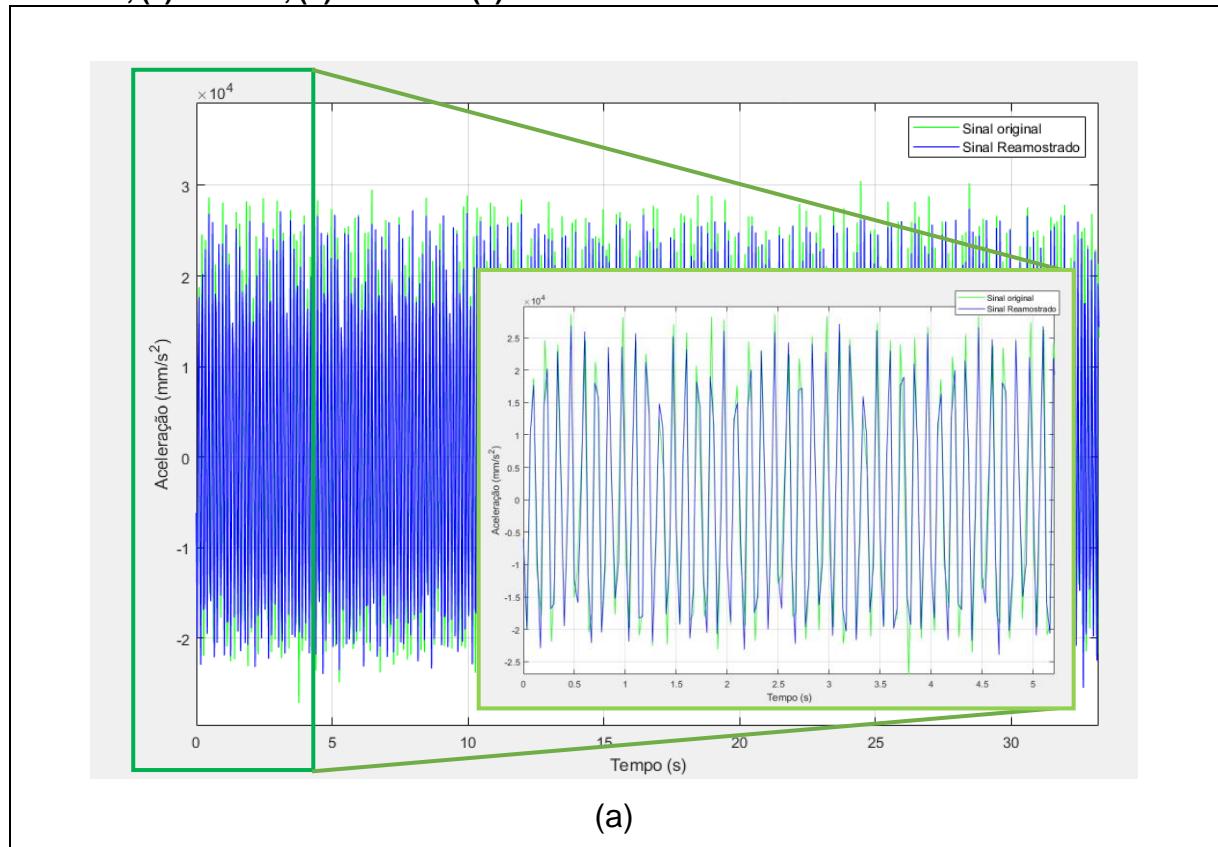


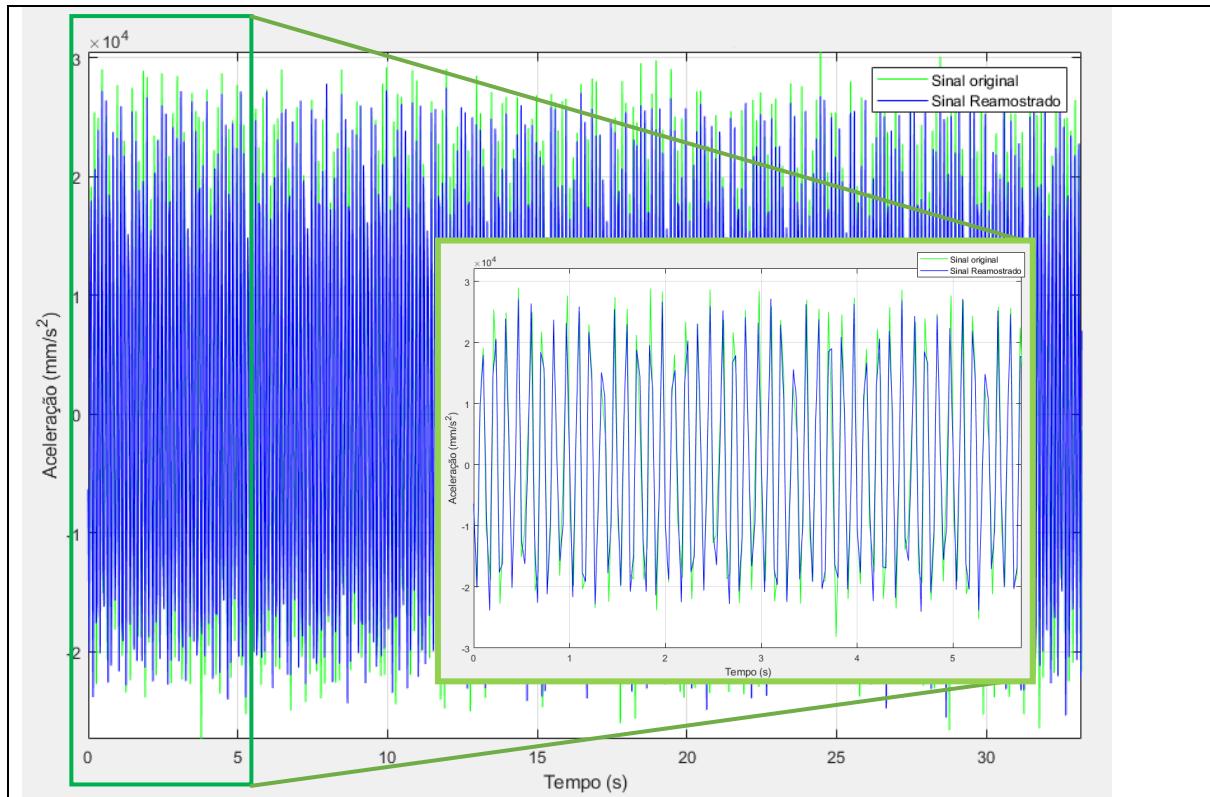
Fonte: Autoria própria.

De posse do conjunto de coeficientes para cada calibração (variação de quantidade de fotos adquiridas), foi utilizado uma única mesma aquisição de imagem do movimento de deslocamento imposto a haste eixo do atuador eletromecânico na forma senoidal, com frequência de 8 Hz. Na

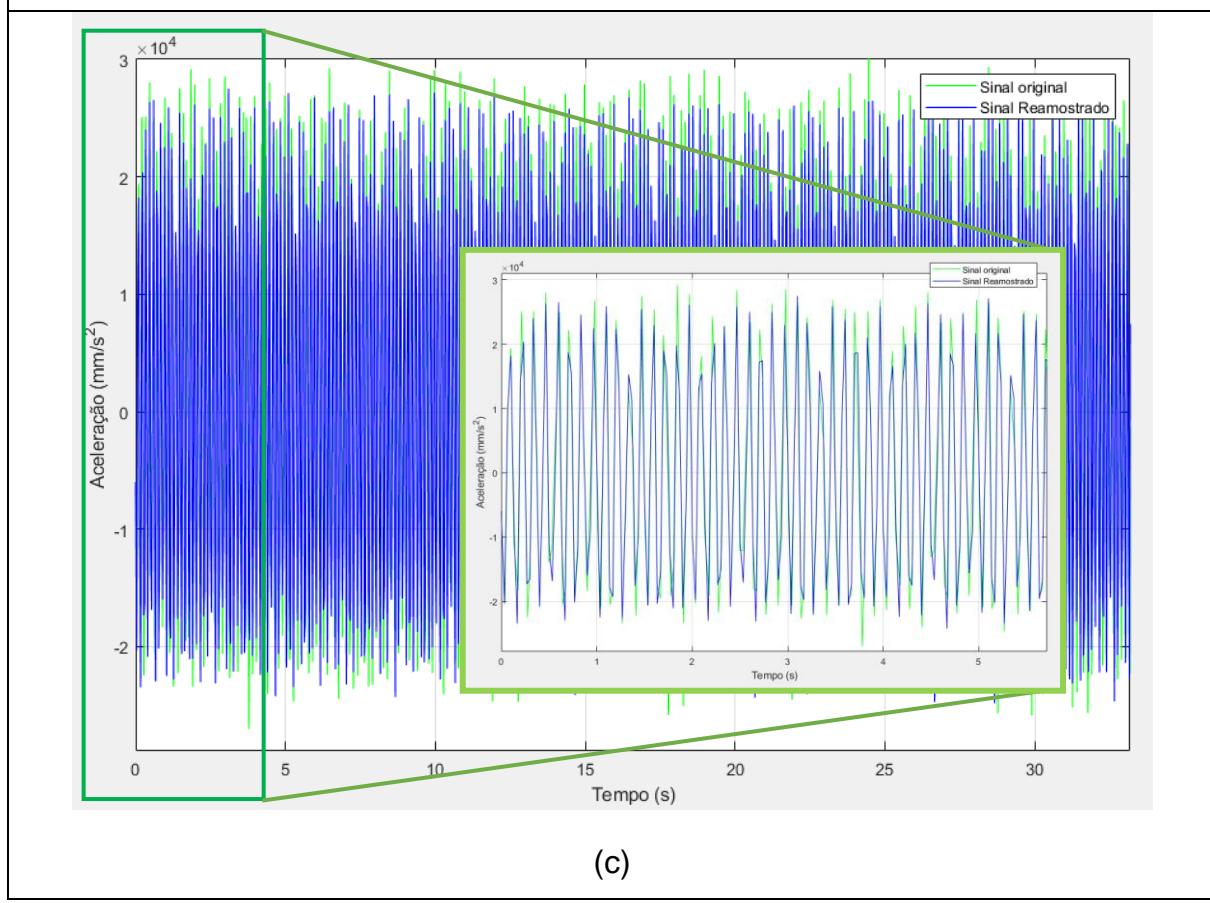
Figura 41 em verde representam a aceleração do alvo percebido pelo algoritmo ao longo do tempo e com finalidade de obter uma frequência amostral uniforme, todos os pontos calculados têm reamostragem do tipo “spline” para de obter uma frequência amostral uniforme, obtendo assim a frequência amostral uniforme de 30,029 Hz, conforme podem ser observados em azul nas mesmas figuras.

Figura 41 – Aceleração do alvo percebido pelo algoritmo com calibração de (a) 10 fotos, (b) 21 fotos, (c) 37 fotos, (d) 55 fotos e (e) 177 fotos.

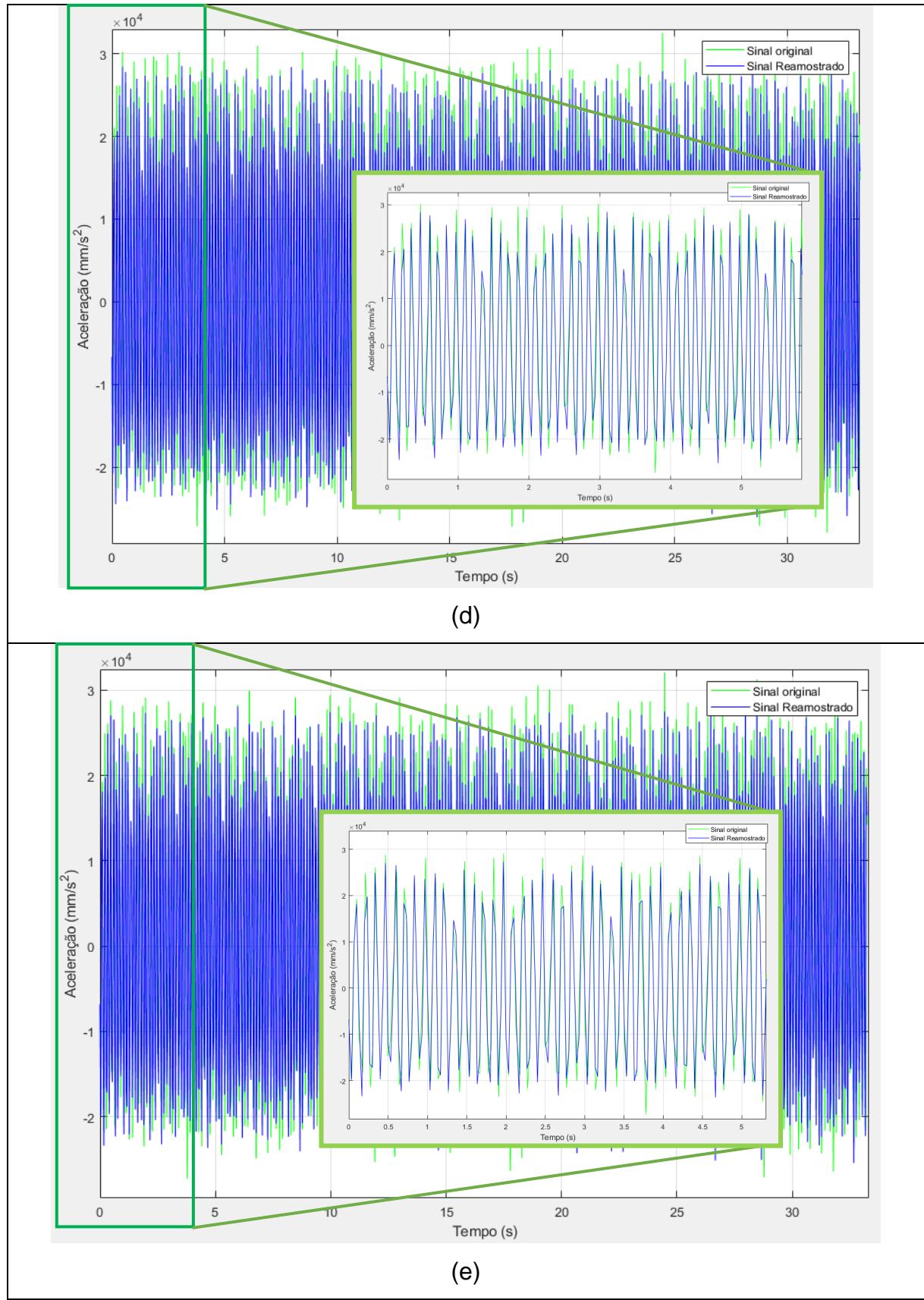




b)



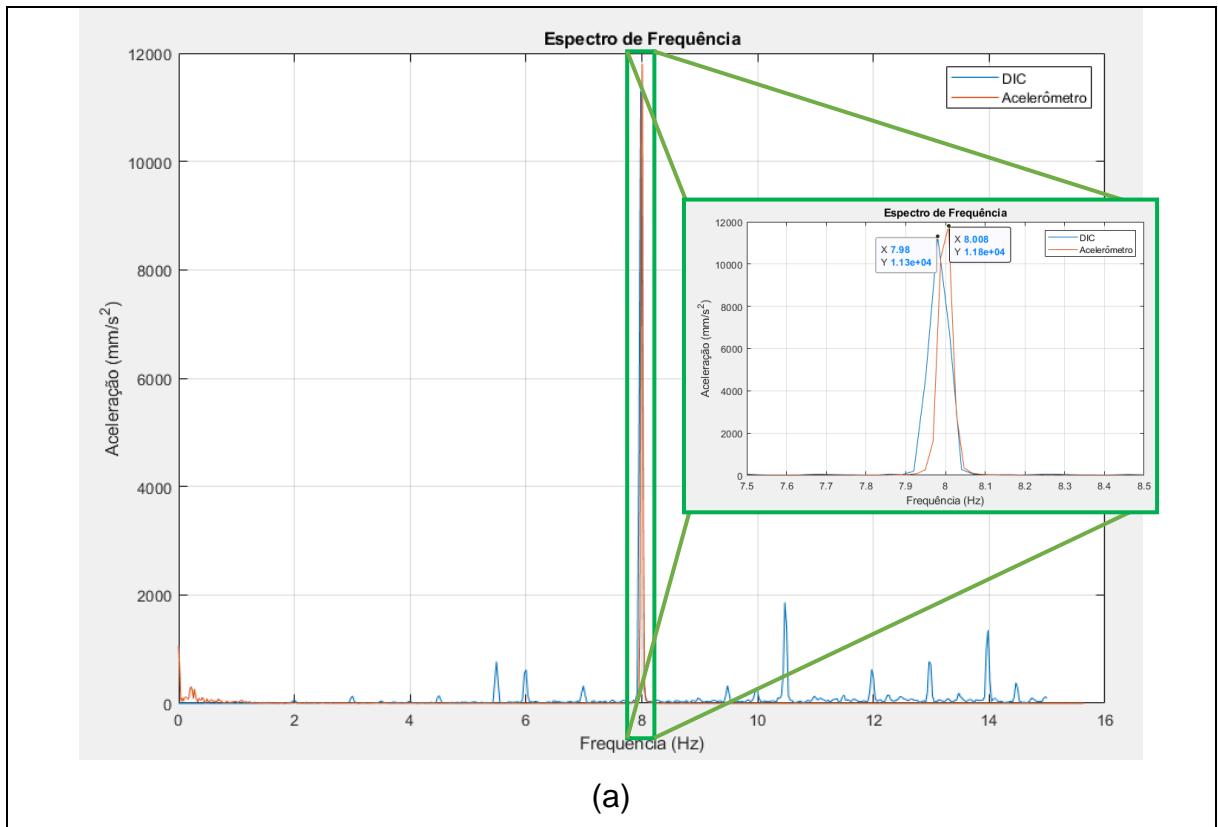
(c)

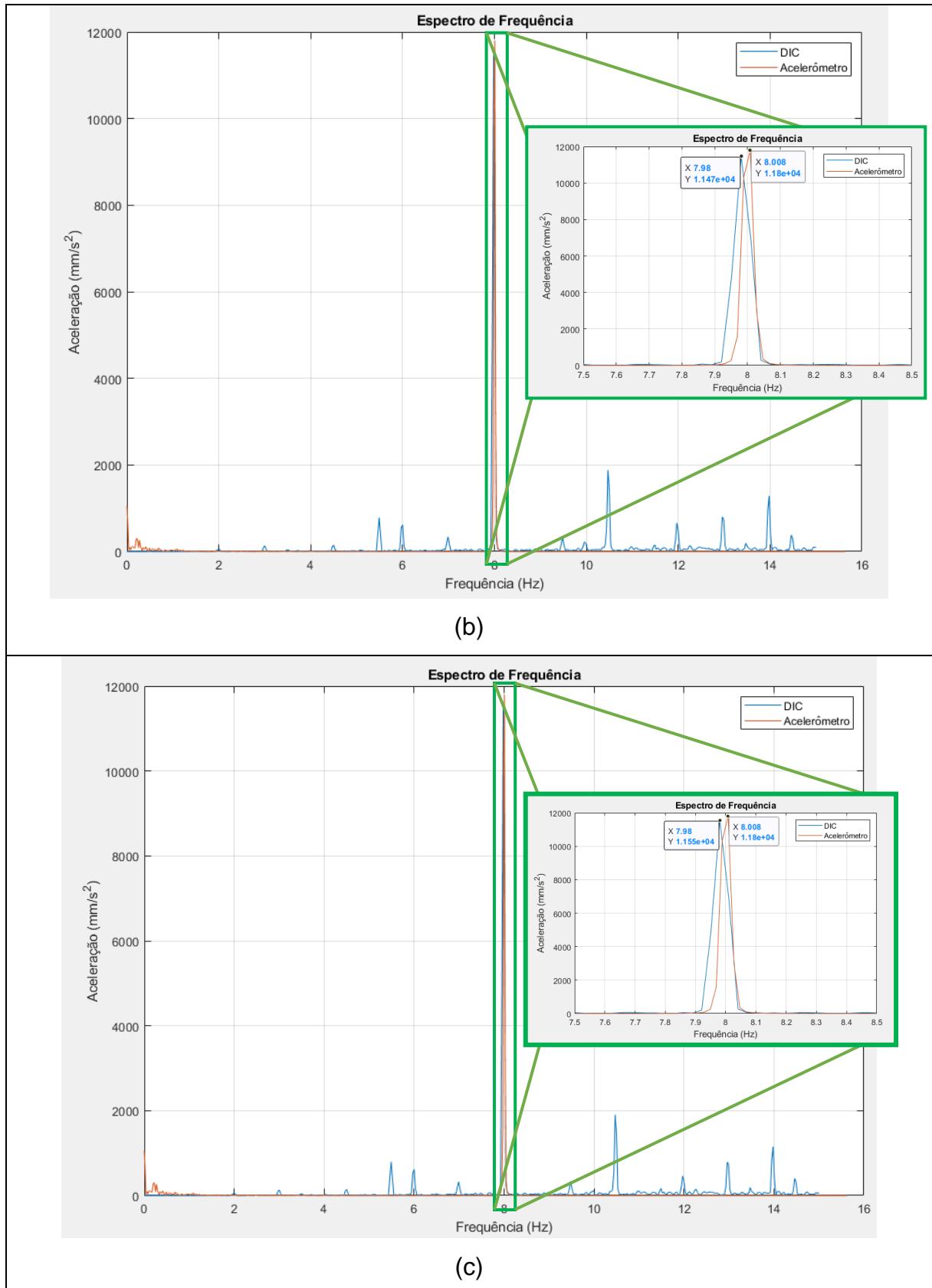


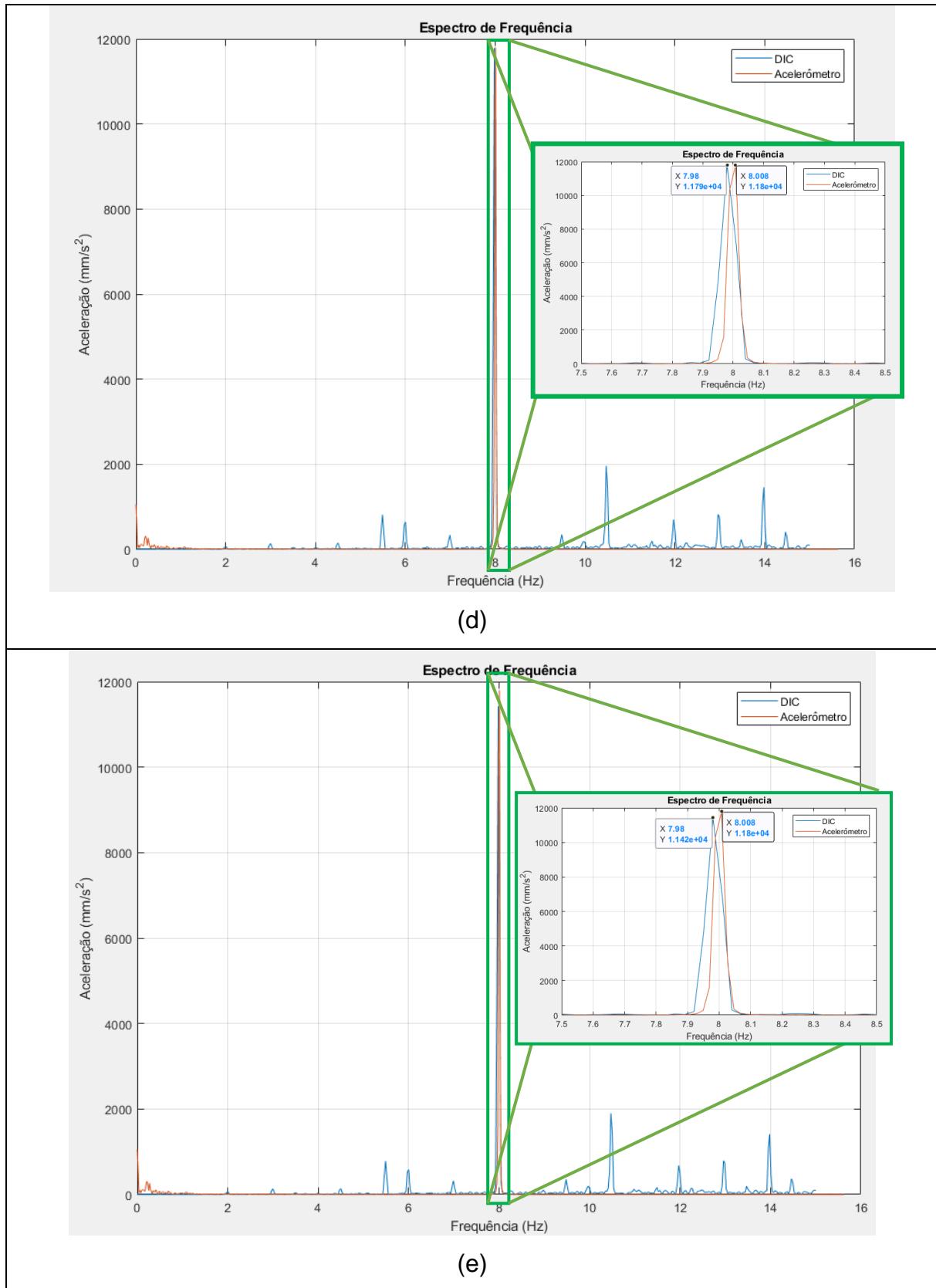
Fonte: Autoria própria.

Após identificados os deslocamentos pela metodologia proposta, o sinal de aceleração no domínio do tempo foi tratado com a transformada rápida de Fourier com um filtro passa-faixas de ordem 3 na banda de frequência entre 0,30Hz e 13,51Hz (a fim de satisfazer o critério de Nyquist) para permitir a leitura do deslocamento dinâmico imposto no domínio da frequência. Como base de comparação foram utilizados os resultados obtidos pelo acelerômetro. Os resultados obtidos são apresentados na Figura 42 (a), (b), (c), (d) e (e) para a calibração com 10, 25, 50, 100 e 200 fotos, respectivamente.

Figura 42– Espectro de frequência do alvo com (a) 10 foto, (b) 25 fotos,(c) 50 fotos, (d) 100 fotos e (e) 200 fotos.







Fonte: Autoria própria.

Visualmente observa-se que, em todos os gráficos foi identificado o pico do deslocamento da haste do Shaker em 7,980 Hz. Esta pequena diferença de resultado pode estar associada à discretização em frequência das câmeras, já que o tempo total de aquisição total foi de 35s, o que resultou em uma discretização em frequência aproximadamente 0,030 Hz. Portanto, a leitura é compatível ao que se deseja alcançar. O acelerômetro por sua vez, realizou a leitura da frequência do deslocamento de 8,008Hz, com discretização de 0,019 Hz.

Com relação ao domínio espacial, as amplitudes detectadas pelo algoritmo em aceleração são de $1,130 \times 10^4 \text{ mm/s}^2$; $1,147 \times 10^4 \text{ mm/s}^2$; $1,155 \times 10^4 \text{ mm/s}^2$; $1,179 \times 10^4 \text{ mm/s}^2$ e $1,142 \times 10^4 \text{ mm/s}^2$ para calibração com 10, 20, 50, 100 e 200 fotos respectivamente. O acelerômetro realizou a leitura da aceleração do movimento com pico em $1,180 \times 10^4 \text{ mm/s}^2$ e erro de medida máxima de $0,023 \times 10^4 \text{ mm/s}^2$ devido a sua sensibilidade. Isto demonstra também que a amplitude de aceleração detectada pelo algoritmo foi muito próxima à aceleração detectada pelo acelerômetro e placa de aquisição correspondendo a proximidade de resultado em amplitude de 95,7%; 97,2%; 97,8%; 99,9% e 96,7% em relação à técnica clássica.

Portanto, observou-se que a amostra que obteve os melhores resultados foi a com 100 fotos. O resultado alcançado ocorre possivelmente devido ao alcance próximo do número de pontos necessários para a ideal caracterização do par de câmeras, que passa a divergir seus valores ou não ser eficiente pelo método de otimização implementado no algoritmo de calibração quando implementado o número de pontos em excesso. O Quadro 5 demonstra os resultados obtidos de maneira resumida.

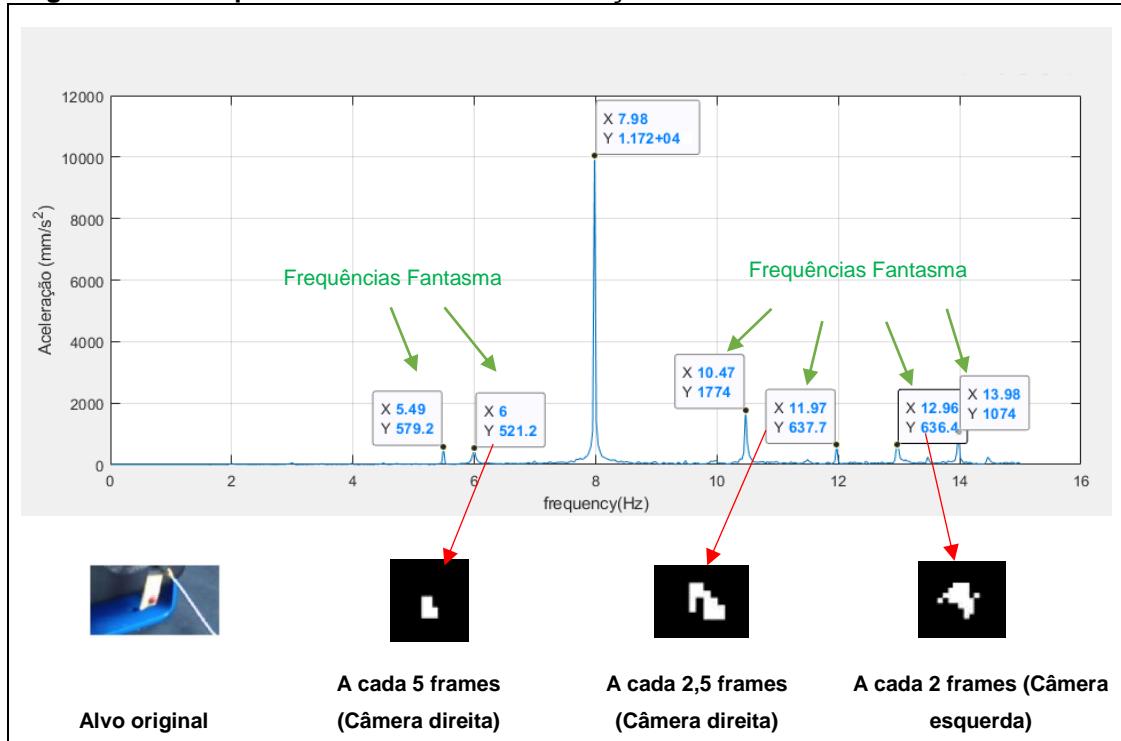
Quadro 5 – Resultados do experimento.

Câmeras					Aproximação	Acelerômetro		
Fotos	Efetivo	Amplitude obtida (mm/s^2)	Frequência obtida (Hz)	ΔF (Hz)		Amplitude obtida (mm/s^2)	Frequência obtida (Hz)	ΔF (Hz)
10	10	$1,130 \times 10^4$	7,98	0,03	95,7%	$1,18 \times 10^4$	8,008	0,019
25	21	$1,147 \times 10^4$	7,98	0,03	97,2%			
50	37	$1,155 \times 10^4$	7,98	0,03	97,8%			
100	55	$1,179 \times 10^4$	7,98	0,03	99,9%			
200	177	$1,142 \times 10^4$	7,98	0,03	96,7%			

Fonte: Autoria Própria.

Nota-se também que, a amplitude da aceleração apresentou picos discrepantes em algumas frequências múltiplas como 5,49Hz; 6Hz; 10,47Hz; 11,97Hz; 12,96Hz e 13,98Hz com amplitude de até 20% do sinal de interesse. Tais picos podem estar associados à capacidade de identificação de alvos da metodologia com base no filtro de cores e a velocidade do obturador que podem alterar a cor captada pelo sensor da câmera e por consequência no processo de pós processamento alteram o formato do alvo em certas posições adquirindo formas diferentes por onde o alvo passa, seja devido a iluminação ou pela velocidade. Este fenômeno observado experimentalmente podem resultar em “frequências fantasma” conforme demonstrado na Figura 43.

Figura 43 – “Frequências fantasma” na calibração com 100 amostras



Fonte: Autoria própria.

Além disso um problema associado ao Aliasing ocasionado pela utilização de filtro de frequência inapropriado também pode justificar os valores múltiplos de frequência. Estes efeitos identificados no espectro de frequência será alvo de estudo em trabalhos futuros com testes experimentais.

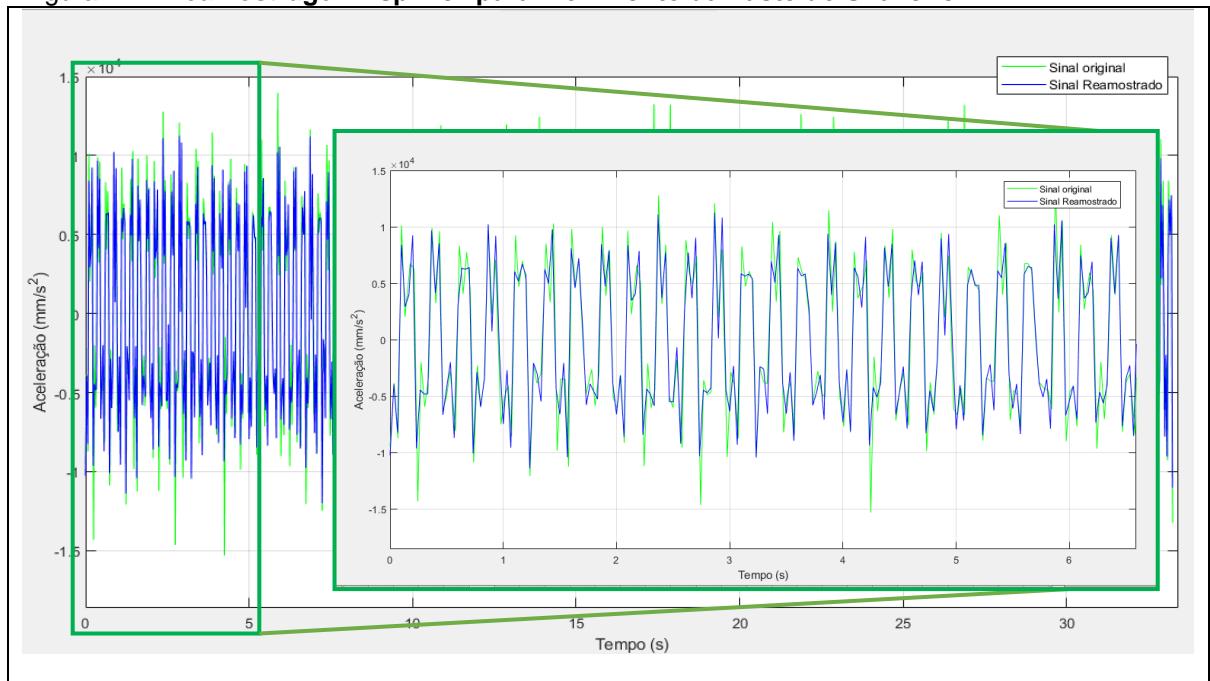
5.2 Experimento 2 - Variação da frequência do sinal

O presente experimento consiste na aquisição e análise de deslocamento dinâmico da haste sob diferente frequência de deslocamento. Para isso foi utilizado o aparelho experimental e condições de filmagens análogas às apresentadas no experimento anterior e ainda foi considerada a calibração de 100 fotos para caracterização do par de câmeras. O movimento de deslocamento da haste eixo, controlado pelo atuador eletromecânico, foi na forma senoidal e foram avaliadas as frequências de deslocamento de 4 Hz, com amplitude de sinal de entrada de 0,8 Volts.

A captura do movimento através do sistema de aquisição foi realizada uma vez para cada frequência de deslocamento com resolução de 640x480 pixels, tempo de vídeo total de 33,342 segundos e 1000 frames resultando numa taxa de aquisição média de 29,99 Hz.

Assim o novo vídeo obtido foi processado pelo código implementado em MATLAB e assim foram obtidos os gráficos das acelerações assumidas pelo alvo ao longo do tempo e representam o deslocamento dinâmico do alvo obtido pela presente metodologia, conforme mostrado Figura 44. O movimento de deslocamento identificado pelo algoritmo é apresentado em verde, enquanto a cor azul representa as reamostras “spline” com objetivo de uniformizar a amostra em 29,99 Hz.

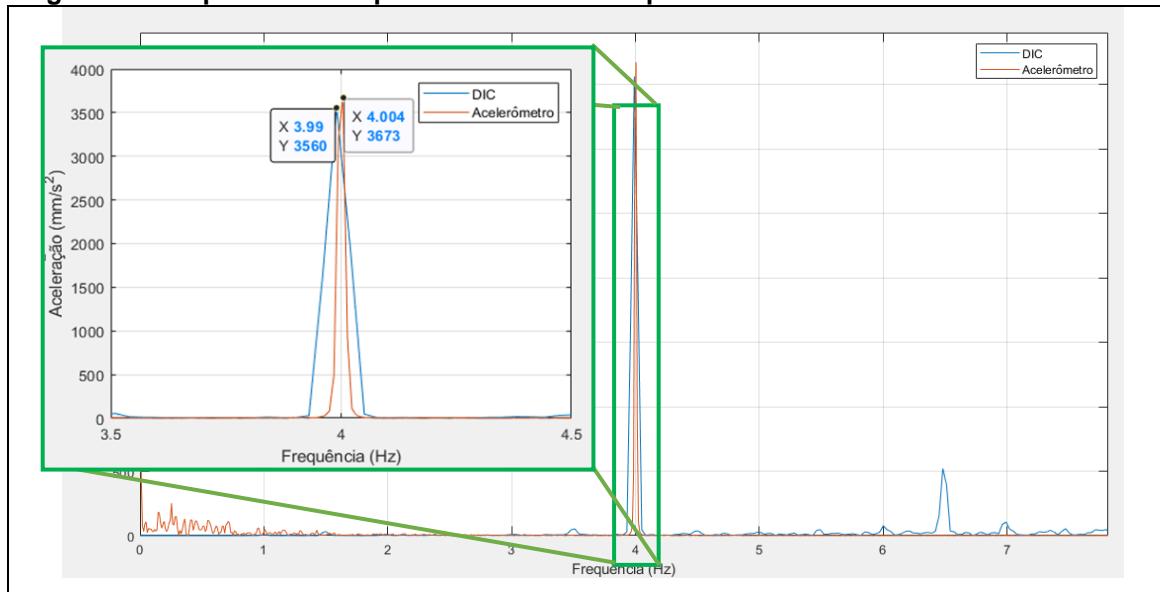
Figura 44 – Reamostragem “spline” para movimento da haste do Shaker em 4Hz.



Fonte: Autoria própria.

Em posse destes dados obtidos, foi aplicado um filtro de frequência bandpass de ordem 3 para a frequência na banda entre 0,30Hz e 7,50Hz e realizado a transformada de Fourier destes dados experimentais, assim como o Experimento 1. Já a banda de frequência do acelerômetro foi de 0 até 7,8Hz contendo 800 linhas espetrais, resultando em resolução em frequência de 0,010Hz. Assim a comparação dos espectros de frequência dos sinais obtidos são confrontados conforme exposto na Figura 45.

Figura 45 – Espectro de frequência do alvo do Experimento 2.



Fonte: Autoria própria.

Nota-se que foi identificado o pico do deslocamento da haste do Shaker próxima à frequência de interesse com a leitura da frequência 3,985 Hz para a frequência de 4Hz, possuindo erro de discretização em frequência de 0,03Hz. O acelerômetro realizou a leitura da frequência do deslocamento de 4,004Hz com erro de discretização de 0,010Hz demonstrando que a metodologia é eficiente para a detecção de mudança de frequência. Em relação ao domínio espacial, a amplitude detectada pelo algoritmo em aceleração é de $3,560 \times 10^3 \text{ mm/s}^2$; para a frequência de 4Hz e o acelerômetro por sua vez realizou a leitura da aceleração do movimento com pico em $3,673 \times 10^3 \text{ mm/s}^2$ com erro de medida de $0,073 \times 10^3 \text{ mm/s}^2$ devido a sensibilidade do acelerômetro. Este resultado calculado corresponde a proximidade em 96,9% da amplitude do sinal de referência. O Quadro 6 demonstra em resumo estes resultados.

Quadro 6 – Resultado da mudança de frequência no deslocamento do Shaker.

Câmeras					Aproximação	Acelerômetro		
Fotos	Efetivo	Amplitude obtida (mm/s ²)	Frequência obtida (Hz)	ΔF (Hz)		Amplitude obtida (mm/s ²)	Frequência obtida (Hz)	ΔF (Hz)
100	55	$3,560 \times 10^3$	3,985	0,03	96,9%	$3,673 \times 10^3$	4,004	0,01

Fonte: Autoria Própria.

A Figura 45 apresenta também picos em algumas frequências diferentes do sinal de interesse. Neste experimento surgiram picos em 6Hz; 6,5Hz e 7Hz onde estes erros sistêmicos por conter as mesmas características às “frequências fantasma” dos resultados do experimento 1 provavelmente estão relacionados à mesma origem.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente trabalho apresentou uma metodologia para obtenção de espectro de frequência de medidas de deslocamento dinâmico a partir de processamento e correlação de imagens capturadas por meio de um sistema de aquisição composto por um par de webcams e um computador. Para a validação desta foi necessária a implementação numérica do código de configuração e aquisição de imagens sincronizadas por um par de webcams em ambiente MATLAB, identificar os parâmetros intrínsecos e extrínsecos do par de câmeras ao qual requer fotos de um padrão para a calibração e implementação numérica do código de processamento digital de imagens para determinação da posição pontual do objeto a partir do par de imagens.

No algoritmo algumas sub-rotinas de trabalhos anteriores desenvolvidos no âmbito do Laboratório Tecnológico de Vibrações Mecânicas (LTVM) foram adaptados, pois os mesmos não estavam preparados para realização de 3D-DIC para deslocamentos dinâmicos. Entre as maiores contribuições deste trabalho além da própria elaboração do roteiro para aplicação da metodologia estão:

- Aquisição sincronizada com total controle de parâmetros do par de câmeras, substituindo até mesmo o software de captura da fabricante das webcams (seção 3.1).
- Separação de alvos para qualquer tonalidade de cor visível no espectro de cores (subseção 3.3.2)
- Metodologia de organização para vários alvos (subseção 3.3.4)
- Reamostragem de sinal para taxas de aquisição não uniforme (subseção 3.3.6)
- Organização, adaptação e otimização dos algoritmos já implementados
- Criação de uma interface ao usuário.

A validação da metodologia apresentada foi realizada por meio de testes experimentais. Desta forma foi realizado a montagem de um Shaker para a realização de um movimento controlado e filmagem da haste deste atuador através do código de aquisição, ao qual possibilitou a determinação de resultados através do processamento de imagens obtidas do movimento.

A leitura deste movimento controlado também foi realizada através de um acelerômetro e uma placa de aquisição, sendo esta por ser uma técnica clássica de medição de vibração. Estes testes experimentais permitiram detectar, analisar e mensurar deslocamentos dinâmicos de baixa frequência por meio da metodologia proposta e confrontar com método clássico (através de acelerômetro e placa de aquisição).

O experimento 1 apresentado teve o intuito de verificar a quantidade de fotos necessárias de um padrão para a caracterização do par de câmeras resultando no menor índice de rejeição para calibração quando utilizadas 50 fotos e melhor resultado para 100 fotos. No experimento 2 a técnica proposta foi submetida a testes realizados variando a frequência do deslocamento dinâmico imposto que resultou em resultados satisfatórios aproximando em 95% o resultado obtido pela leitura com acelerômetro.

Desta forma o presente trabalho mostra que, a partir de um par de webcams e um computador, é possível obter o espectro de frequência com resultados muito próximos à medição utilizando acelerômetros considerando as limitações em comum de qualquer sistema de aquisição como taxa de aquisição, número de amostras, amplitude máxima da grandeza física limitada pelo transdutor e etc.

O desdobramento deste trabalho apresenta uma metodologia alternativa para a identificação e aquisição de sinais de vibração com a vantagem do baixo custo dos equipamentos empregados.

A aproximação obtida pela metodologia se mostraram satisfatórios, assim o autor enfatiza que deverá ser estudado mais a fundo as limitações desta ferramenta de medição, como as “frequências fantasma” descrito nos resultados dos experimentos sendo dificuldades para o alcance de resultados de maneira ideal e que deverá ser alvo de trabalhos futuros.

REFERÊNCIAS

- ANDRADE, A. O.; SOARES, A. B. **Técnicas de janelamento de sinais**. Universidade Federal de Uberlândia, 2002.
- BARTILSON, D T.; WIEGHAUS, K T.; HURLEBAUS, S. **Target-less computer vision for traffic signal structure vibration studies**. Mechanical Systems and Signal Processing, v. 60, p. 571-582, 2015.
- BEBERNISS, T. J.; EHRHARDT, D. A. **High-speed 3D digital image correlation vibration measurement: Recent advancements and noted limitations**. Mechanical Systems and Signal Processing, v. 86, p. 35-48, 2017.
- BERTON JUNIOR, J. **Medida de deslocamento em 2D e 3D utilizando câmera digital como sensor sem contato**. 2016. 103f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Cornélio Procópio, 2016.
- BOLTRYK, P. J. et al. **A comparison of precision optical displacement sensors for the 3D measurement of complex surface profiles**. Sensors and Actuators A: Physical, v. 142, n. 1, p. 2-11, 2008.
- BORGES, A. S. **Análise Modal baseada apenas na Resposta – Decomposição no Domínio da Freqüência**. Ilha Solteira, 2006. 104 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2006.
- BOUGUET, J.Y. **Camera Calibration Toolbox for Matlab, Computational Vision at the California Institute of Technology**. 2018. Disponível em: <http://www.vision.caltech.edu/bouguetj/calib_doc/>. Acesso em 02 fev. 2018
- CHEN, J. G. et al. **Structural modal identification through high speed camera video: Motion magnification**. In: Topics in Modal Analysis I, Volume 7. Springer International Publishing, 2014. p. 191-197.
- DAVIES, E. R. **Computer and machine vision: theory, algorithms, practicalities**. Academic Press, 2012.
- DE BOOR, C. et al. **A practical guide to splines**. New York: springer-verlag, 1978.
- FAUGERAS, O. **Three-dimensional computer vision a geometric point of view**. MIT Press, Cambridge, Massachusetts, 1993.
- GONZALES, R. C.; WOODS, R. E. **Digital Image Processing**. 2008. Pearson.
- GWASHAVANHU, B.; OBERHOLSTER, A. J.; HEYNS, P. S. **Rotating blade vibration analysis using photogrammetry and tracking laser Doppler vibrometry**. Mechanical Systems and Signal Processing, v. 76, p. 174-186, 2016.
- HARTLEY, R.; ZISSELMAN, A. **Multiple view geometry in computer vision**. Cambridge university press, 2003. ndrew

HEIKKILA, J.; SILVEN, O. **A four-step camera calibration procedure with implicit image correction.** In: cvpr. IEEE, 1997. p. 1106.

HELFICK, Mark N. et al. **3D digital image correlation methods for full-field vibration measurement.** Mechanical systems and signal processing, v. 25, n. 3, p. 917-927, 2011.

HSU, C. et al. **“Distance measurement based on pixel variation of CCD images”.** ISA transactions, v. 48, n. 4, p. 389-395, 2009.

JESUS, Edison O.; COSTA JR, Roberto. **A utilização de filtros gaussianos na análise de imagens digitais.** Proceeding Series of the Brazilian Society of Computational and Applied Mathematics, v. 3, n. 1, 2015.

JI, X. ; YANG, X. ; CHEN, J. **3D displacement measurement by white light digital image analysis in frequency domination area.** Transactions of Tianjin University, v. 14, n. 1, p. 1-6, 2008.

KEESE, A. **Teoria das cores.** Disponível em http://www.exatas.ufpr.br/portal/degraf_rossano/wpcontent/uploads/sites/16/2014/10/teoria-das-cores-Alexandre-Keese.pdf. 2013. Acesso em 08 mar. 2016.

KIM, B. H. **Extracting modal parameters of a cable on shaky motion pictures.** Mechanical Systems and Signal Processing, v. 49, n. 1, p. 3-12, 2014.

KUMARI, G.; BANIK, S.; PREMI, MS G. **“Strain measurement using 3D stereo image correlation”.** In: Innovations in Information, Embedded and Communication Systems (ICIIECS), 2015 International Conference on. IEEE, 2015. p. 1-5.

LEONARDI, D. M. **Medida de deslocamentos e vibrações utilizando uma câmera digital como sensor sem contato.** 2015. 85f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Cornélio Procópio, 2015.

LOBÃO, F. S. **Calibração com mapeamento das distorções geométricas aplicada a um sistema de visão estéreo.** Distrito Federal: Universidade De Brasília. Faculdade De Tecnologia, 2004.

MAITRE, H. **From Photon to Pixel: The Digital Camera Handbook.** John Wiley & Sons, 2015.

MARQUES FILHO, O.; NETO, H. V. **Processamento digital de imagens.** Brasport, 1999.

MARQUES, Oge. **Practical image and video processing using MATLAB.** John Wiley & Sons, 2011.

MENESES, P. R. et al. **Introdução ao processamento de imagens de sensoriamento remoto.** Brasília: UnB, p. 01-33, 2012.

OLIVEIRA, R. A. de. **Visão computacional rápida utilizando rede neural implementada em processamento paralelo.** Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo, 2002.

- OPPENHEIM, A. V.; WILLSKY, A. S.; NAWAB, S.H. **Signals and Systems**. 1997.
- PARK, J. **CMOS Image Sensor for Smart Cameras**. In: Theory and Applications of Smart Cameras. Springer Netherlands, 2016. p. 3-20.
- PARK, S. W. et al. **3D displacement measurement model for health monitoring of structures using a motion capture system**. Measurement, v. 59, p. 352-362, 2015.
- PINOLI, J. **Mathematical foundations of image processing and analysis**. John Wiley & Sons, 2014.
- REU, P. L.; ROHE, D. P.; JACOBS, L. D. **Comparison of DIC and LDV for practical vibration and modal measurements**. Mechanical Systems and Signal Processing, v. 86, p. 2-16, 2017.
- REYNOLDS, P.; PAVIC, A. **Impulse hammer versus shaker excitation for the modal testing of building floors**. Experimental Techniques, v. 24, n. 3, p. 39-44, 2000.
- RISSÁ, H. S. "Identificação de deslocamentos de baixa amplitude e frequência utilizando uma câmera digital". 2017; 110 f. Dissertação (Mestrado) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Cornélio Procópio, 2017.
- SABINO, D. D. **Medidas de deslocamento e vibrações através de imagens de câmeras digitais**. 2013.
- SCURI, A. E. "Fundamentos da imagem digital". Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, 1999.
- SHANG, Y. et al. **Displacement and deformation measurement for large structures by camera network**. Optics and Lasers in Engineering, v. 54, p. 247-254, 2014.
- SUTTON, M. A. et al. **The effect of out-of-plane motion on 2D and 3D digital image correlation measurements**. Optics and Lasers in Engineering, v. 46, n. 10, p. 746-757, 2008.
- TSAI, R. **A versatile camera calibration technique for high-accuracy 3D machine vision metrology using off-the-shelf TV cameras and lenses**. IEEE Journal on Robotics and Automation, v. 3, n. 4, p. 323-344, 1987.
- VELZEL, C. **A Course in Lens Design**. Springer, 2014.
- WANG, J. et. al. **A new calibration model and method of câmera lens distortion**. IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems. 2006.
- WANG, W.; ZHU, J.; LIN, J. **Calibration of a stereoscopic system without traditional distortion models**. Optical Engineering, v. 52, n. 9, p. 093104-093104, 2013.

- WENG, J.; COHEN, P.; HERNIOU, M. **Camera calibration with distortion models and accuracy evaluation.** IEEE Transactions on Pattern Analysis & Machine Intelligence, n. 10, p. 965-980, 1992.
- XIAO, Y.; SU, X.; CHEN, W. **Flexible geometrical calibration for fringe-reflection 3D measurement.** Optics letters, v. 37, n. 4, p. 620-622, 2012.
- XU, G. et al. **Precision evaluation of three-dimensional feature points measurement by binocular vision.** Journal of the Optical Society of Korea, v. 15, n. 1, p. 30-37, 2011.
- XUE, Y. et al. **High-accuracy and real-time 3D positioning, tracking system for medical imaging applications based on 3D digital image correlation.** Optics and Lasers in Engineering, v. 88, p. 82-90, 2017.
- YU, L.; PAN, B. **Full-frame, high-speed 3D shape and deformation measurements using stereo-digital image correlation and a single color high-speed camera.** Optics and Lasers in Engineering, v. 95, p. 17-25, 2017.
- ZHANG, Z. **A Flexible New Technique for Camera Calibration.** IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence.Vol. 22, No. 11, 2000, pp. 1330–1334.

APÊNDICE - CARACTERIZAÇÃO DE CÂMERAS DO EXPERIMENTO 1

Quadro 7- – Parâmetros Obtidos no experimento 1 para 10 fotos

Parâmetros Intrínsecos								
	Câmera 1	Câmera 2		Câmera 1	Câmera 2			
Distorção Radial	$k_1=0,1106$ $k_2=-0,3843$ $k_3=0,4294$	$k_1=-0,0149$ $k_2=0,1183$ $k_3=-0,5009$	Erro (pixel)	$\varepsilon = 0,1283$	$\varepsilon = 0,1266$			
Distorção Tangencial	$p_1=-0,0032$ $p_2=-0,0054$	$p_1=-0,0084$ $p_2=-0,0187$						
Distância focal (mm.pixel)	$h_{fsu}=606,9367$ $h_{fsv}=609,6866$	$h_{fsu}=606,7851$ $h_{fsv}=608,1263$						
Eixo central (pixel)	$u_1=326,6248$ $v_1=238,1058$	$u_2=311,2976$ $v_2=243,5021$						
Resolução (pixel)	$u_{máx}=640$ $v_{máx}=480$	$u_{máx}=640$ $v_{máx}=480$						
Parâmetros Extrínsecos								
Rotação da câmera 2 em relação a câmera 1	$[R] =$ $\begin{bmatrix} 0,8299 & -0,0789 & 0,5524 \\ 0,0636 & 0,9969 & 0,0469 \\ -0,5543 & -0,0038 & 0,8323 \end{bmatrix}$			Erro (pixel)	$\varepsilon = 0,1275$			
Translação da câmera 2 em relação a câmera 1	$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 186,9954 \\ -12,8108 \\ 103,1842 \end{bmatrix}$							
Matriz Fundamental	$F =$ $\begin{bmatrix} 2,8976e^{-06} & -2,7966e^{-04} & 4,8711e^{-02} \\ -4,7853e^{-05} & -5,9373e^{-06} & 3,3293e^{-01} \\ 3,9509e^{-03} & 3,9559e^{-01} & -12,7959 \end{bmatrix}$							
Número de padrões considerados	10							

Quadro 8 – Parâmetros Obtidos no experimento 1 para 25 fotos

Parâmetros Intrínsecos								
	Câmera 1	Câmera 2		Câmera 1	Câmera 2			
Distorção Radial	$k_1=0,1387$ $k_2=-0,3563$ $k_3=0,3406$	$k_1=0,0556$ $k_2=-0,0517$ $k_3=-0,1760$	Erro (pixel)	$\varepsilon = 0,1259$	$\varepsilon = 0,1257$			
Distorção Tangencial	$p_1=0,0012$ $p_2=-0,0032$	$p_1=-0,0021$ $p_2=-0,0102$						
Distância focal (mm.pixel)	$h_{fsu}=616,0025$ $h_{fsv}=615,2332$	$h_{fsu}=613,5959$ $h_{fsv}=614,1828$						
Eixo central (pixel)	$u_1=320,3375$ $v_1=247,3283$	$u_2=318,4677$ $v_2=250,4323$						
Resolução (pixel)	$u_{máx}=640$ $v_{máx}=480$	$u_{máx}=640$ $v_{máx}=480$						
Parâmetros Extrínsecos								
Rotação da câmera 2 em relação a câmera 1	$[R] =$ $\begin{bmatrix} 0,8219 & -0,0828 & 0,5636 \\ 0,0698 & 0,9966 & 0,0447 \\ -0,5654 & -0,0026 & 0,8248 \end{bmatrix}$			Erro (pixel)	$\varepsilon = 0,1258$			
Translação da câmera 2 em relação a câmera 1	$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 185,6921 \\ -14,6146 \\ 107,1849 \end{bmatrix}$							
Matriz Fundamental	$F =$ $\begin{bmatrix} 1,7021e^{-06} & -2,8468e^{-04} & 4,9770e^{-02} \\ -4,3782e^{-05} & -2,1861e^{-06} & 3,3335e^{-01} \\ 4,9466e^{-03} & 3,9365e^{-01} & -13,1703 \end{bmatrix}$							
Número de padrões considerados	21							

Quadro 9 – Parâmetros Obtidos no experimento 1 para 50 fotos

Parâmetros Intrínsecos								
	Câmera 1	Câmera 2		Câmera 1	Câmera 2			
Distorção Radial	$k_1=0,1327$ $k_2=0,0918$ $k_3=-0,6312$	$k_1=0,1789$ $k_2=-0,6702$ $k_3=1,0763$	Erro (pixel)	$\varepsilon = 0,2561$	$\varepsilon = 0,2447$			
Distorção Tangencial	$p_1=0,0062$ $p_2=-0,0182$	$p_1=-0,0045$ $p_2=-0,0062$						
Distância focal (mm.pixel)	$h_{fsu}=631,6424$ $h_{fsv}=628,8663$	$h_{fsu}=627,8525$ $h_{fsv}=626,3480$						
Eixo central (pixel)	$u_1=304,0373$ $v_1=253,9891$	$u_2=321,1240$ $v_2=259,6059$						
Resolução (pixel)	$u_{máx}=640$ $v_{máx}=480$	$u_{máx}=640$ $v_{máx}=480$						
Parâmetros Extrínsecos								
Rotação da câmera 2 em relação a câmera 1	$[R] =$ $\begin{bmatrix} 0,8134 & -0,0873 & 0,5751 \\ 0,0724 & 0,9962 & 0,0488 \\ -0,5771 & 0,0020 & 0,8166 \end{bmatrix}$			Erro (pixel)	$\varepsilon = 0,2504$			
Translação da câmera 2 em relação a câmera 1	$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 184,8021 \\ -15,8304 \\ 108,2551 \end{bmatrix}$							
Matriz Fundamental	$F =$ $\begin{bmatrix} 8,7457e^{-07} & -2,7509e^{-04} & 4,8672e^{-02} \\ -4,6054e^{-05} & -2,9785e^{-06} & 3,3259e^{-01} \\ 6,5194e^{-03} & 3,8367e^{-01} & -13,0341 \end{bmatrix}$							
Número de padrões considerados	37							

Quadro 10 – Parâmetros Obtidos no experimento 1 para 100 fotos

Parâmetros Intrínsecos								
	Câmera 1	Câmera 2		Câmera 1	Câmera 2			
Distorção Radial	$k_1=0,1208$ $k_2=-0,0333$ $k_3=-0,2978$	$k_1=0,1581$ $k_2=-0,3390$ $k_3=0,02640$	Erro (pixel)	$\varepsilon = 0,1988$	$\varepsilon = 0,1935$			
Distorção Tangencial	$p_1=0,0015$ $p_2=-0,0075$	$p_1=-0,0041$ $p_2=-0,0035$						
Distância focal (mm.pixel)	$h_{fsu}=632,6812$ $h_{fsv}=630,2882$	$h_{fsu}=631,3443$ $h_{fsv}=629,7352$						
Eixo central (pixel)	$u_1=314,3444$ $v_1=250,5677$	$u_2=333,2562$ $v_2=258,5379$						
Resolução (pixel)	$u_{máx}=640$ $v_{máx}=480$	$u_{máx}=640$ $v_{máx}=480$						
Parâmetros Extrínsecos								
Rotação da câmera 2 em relação a câmera 1	$[R] =$ $\begin{bmatrix} 0,8125 & -0,0878 & 0,5763 \\ 0,0699 & 0,9961 & 0,0533 \\ -0,5787 & 0,0030 & 0,8155 \end{bmatrix}$			Erro (pixel)	$\varepsilon = 0,1962$			
Translação da câmera 2 em relação a câmera 1	$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 182,4916 \\ -16,1422 \\ 115,9674 \end{bmatrix}$							
Matriz Fundamental	$F =$ $\begin{bmatrix} 2,2103e^{-06} & -2,9246e^{-04} & 5,2293e^{-02} \\ -2,7443e^{-05} & -4,0881e^{-06} & 3,3258e^{-01} \\ 1,7568e^{-03} & 3,8872e^{-01} & -12,4345 \end{bmatrix}$							
Número de padrões considerados	55							

Quadro 11 – Parâmetros Obtidos no experimento 1 para 200 fotos

Parâmetros Intrínsecos								
	Câmera 1	Câmera 2		Câmera 1	Câmera 2			
Distorção Radial	$k_1=0,1342$ $k_2=-0,3566$ $k_3=0,3190$	$k_1=0,1121$ $k_2=-0,2019$ $k_3=0,0050$	Erro (pixel)	$\varepsilon = 0,2197$	$\varepsilon = 0,2147$			
Distorção Tangencial	$p_1=0,0014$ $p_2=-0,0005$	$p_1=-0,0026$ $p_2=-0,0017$						
Distância focal (mm.pixel)	$h_{fsu}=614,7455$ $h_{fsv}=613,3802$	$h_{fsu}=616,0456$ $h_{fsv}=615,2960$						
Eixo central (pixel)	$u_1=321,6704$ $v_1=248,5845$	$u_2=324,6823$ $v_2=247,6786$						
Resolução (pixel)	$u_{máx}=640$ $v_{máx}=480$	$u_{máx}=640$ $v_{máx}=480$						
Parâmetros Extrínsecos								
Rotação da câmera 2 em relação a câmera 1	$[R] =$ $\begin{bmatrix} 0,8178 & -0,0809 & 0,5698 \\ 0,0714 & 0,9967 & 0,0391 \\ -0,5711 & 0,0087 & 0,8209 \end{bmatrix}$			Erro (pixel)	$\varepsilon = 0,2172$			
Translação da câmera 2 em relação a câmera 1	$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 183,6633 \\ -14,6196 \\ 113,1438 \end{bmatrix}$							
Matriz Fundamental	$F =$ $\begin{bmatrix} 2,1845e^{-06} & -2,9994e^{-04} & 5,2782e^{-02} \\ -3,2043e^{-05} & -2,3673e^{-06} & 3,4031e^{-01} \\ 2,4950e^{-03} & 3,9693e^{-01} & -12,6888 \end{bmatrix}$							
Número de padrões considerados	177							