

**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JULIO DE MESQUITA FILHO”
FACULDADE DE ENGENHARIA
CAMPUS DE ILHA SOLTEIRA**

DANILO DAMASCENO SABINO

**MEDIDAS DE DESLOCAMENTO E VIBRAÇÕES ATRAVÉS DE IMAGENS DE
CÂMERAS DIGITAIS**

Ilha Solteira

2013

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

**“MEDIDAS DE DESLOCAMENTO E VIBRAÇÕES
ATRAVÉS DE IMAGENS DE CÂMERAS DIGITAIS”**

Danilo Damasceno Sabino

Orientador: Prof. Dr. João Antonio Pereira

Dissertação apresentada à Faculdade de
Engenharia - UNESP – Campus de Ilha
Solteira, para obtenção do título de Mestre
em Engenharia Mecânica.
Área de Conhecimento: Mecânica dos
Sólidos

FICHA CATALOGRÁFICA
Desenvolvido pelo Serviço Técnico de Biblioteca e Documentação

S116m Sabino, Danilo.
Medidas de deslocamento e vibrações através de imagens de câmeras digitais / Danilo Sabino. – Ilha Solteira: [s.n.], 2013
106 f. : il.

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira. Área de conhecimento: Mecânica dos Sólidos, 2013

Orientador: Prof. Dr. João Antonio Pereira
Inclui bibliografia

1. Medidas de deslocamento. 2. Vibrações. 3. Imagens digitais. 4. Processamento de imagens.



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
CAMPUS DE ILHA SOLTEIRA
FACULDADE DE ENGENHARIA DE ILHA SOLTEIRA

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO: Medidas de deslocamento e vibrações através de imagens de câmeras digitais

AUTOR: DANILO DAMASCENO SABINO

ORIENTADOR: Prof. Dr. JOAO ANTONIO PEREIRA

Aprovado como parte das exigências para obtenção do Título de Mestre em Engenharia Mecânica ,
Área: MECANICA DOS SÓLIDOS, pela Comissão Examinadora:


Prof. Dr. JOAO ANTONIO PEREIRA
Departamento de Engenharia Mecânica / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira


Prof. Dr. MARCIO ANTONIO BAZANI
Departamento de Engenharia Mecânica / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira


Prof. Dr. RICARDO MIKIO DOI
Sociedade Educacional de Santa Catarina - SOCIESC - JOINVILLE (Câmpus de Boa Vista)

Data da realização: 07 de outubro de 2013.

Dedico este trabalho ao meu pai Manoel Messias Sabino e a minha mãe Katia Alves Damasceno Sabino.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus, que me dá folego de vida e renova minhas forças quando mais estou cansado.

Aos meus pais, Messias e Katia, que por toda minha vida me incentivaram e continuam a incentivar a minha busca por conhecimento e melhoria de vida, sempre com muito carinho, amor e atenção.

A minha namorada, que tem me acompanhado compreensivamente por longos anos sabendo dividir o pouco tempo que temos juntos com meus estudos.

Ao meu orientador e amigo Prof. João Antonio Pereira, que com muita serenidade me orientou antes mesmo do início deste trabalho até o resultado final, complementando o assunto abordado neste trabalho de forma admirável.

Aos Profs. Vicente Lopes Junior e Samuel da Silva pelas sugestões no Exame Geral de Qualificação.

Ao Prof. Gustavo Luiz Chagas Manhães de Abreu pela ajuda no desenvolvimento do controle do sistema de medição utilizado no laboratório.

Aos amigos que tive contato durante o desenvolvimento deste trabalho e que contribuíram direta ou indiretamente para a conclusão do mesmo.

Aos membros da banca examinadora, pela revisão, sugestões e comentários pertinentes.

A maior de nossas fraquezas está em desistir. A forma mais certa de chegar ao sucesso é sempre tentar mais uma vez.

Thomas A. Edison

RESUMO

Nesta dissertação é discutido o desenvolvimento e a implementação de uma técnica de medida de deslocamentos utilizando uma única câmera digital, cujo foco principal é a medição de movimento e vibrações estruturais. A proposta é uma técnica de medição de não contato que tem como base a variação da posição dos pixels de um alvo ou conjunto de alvos (pontos de medições) na sequência de imagens do vídeo utilizado para capturar o movimento do alvo ou conjunto de alvos na cena. Os conceitos e o embasamento teórico são apresentados, envolvendo uma discussão de como se dá a formação e obtenção de imagens digitais, a definição e obtenção dos parâmetros intrínsecos da câmera, bem como as técnicas de processamento de imagens utilizadas para a identificação do alvo na cena. A identificação dos alvos é feita a partir da utilização de várias ferramentas de análise e processamento de imagens, dentre elas, separação de cores, detecção de bordas, *thresholding*, erosão e dilatação. O movimento do alvo na sequência de imagens é rastreado em termos de pixels e posteriormente é feita a conversão para unidade de medida utilizando a relação unidade de medida/pixel obtida através de um processo de calibração. A avaliação e validação da proposta foram feitas através de testes experimentais, envolvendo tanto medidas estáticas como dinâmicas. Numa etapa final, a técnica foi utilizada para a análise de vibração de um prédio em escala reduzida, mais especificamente, a análise modal com base apenas na resposta da estrutura. Os resultados e análises realizadas mostraram que a metodologia implementada com base na utilização de uma única câmera se mostrou como uma proposta com alto potencial de aplicação como ferramenta de medição de não-contato, relativamente simples e efetiva.

Palavra - Chave: Medidas de deslocamento. Vibrações. Imagens digitais. Processamento de imagens.

ABSTRACT

In this work is discussed the development and implementation of a technique for measuring of displacements using a single digital camera, whose main focus is the measurement of structural motion and vibrations. The proposal is a non-contact measurement technique, which is based on the variation of the position of the pixels of the target measuring points in the sequence of images of a video used to capture the movement of the target points in the scene. The concepts and theoretical background are presented, involving a discussion concerning to the formation and obtaining of digital images, definition and obtaining of intrinsic parameters of the camera, as well as the image processing techniques used to identify the measuring target points in the scene. The identification of the targets is made from the use of different analysis and image processing tools such as, color separation, edge detection, thresholding, erosion and dilation used in a complementary way. The movement of the target points in the sequence of image is tracked in terms of pixels and then they are converted in measurement unit using the ratio measurement unit/pixel obtained by a calibration process. The evaluation and validation of the proposal were made through experimental tests, involving both static and dynamic measurements. At a final stage, the technique was used to vibration analyze of a reduced scale building structure, more specifically, the output-only modal analysis of the structure. The results and analyzes showed that the methodology implemented based on the use of a unique camera provided to be a proposal with high application potential as a non-contact measurement tool, relatively simple and effective.

Keywords: Displacement measurement. Vibrations. Digital images. Image processing.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Exemplos de aplicações de medidas usando imagens na engenharia	16
Figura 2 - Obtenção de imagem através de uma câmera digital.	21
Figura 3 - Detalhes internos de uma objetiva.	21
Figura 4 – (a) Efeitos “barril” e (b) “almofada” das lentes.	22
Figura 5 - Efeito de distorção tangencial de uma lente	23
Figura 6 - Imagem original com distorções e imagem distorcida.	23
Figura 7 - Características dos espelhos plano, côncavo e convexo.	25
Figura 8 - Distância focal do espelho côncavo e convexo.	26
Figura 9 - Distância entre a face da câmera e o sensor.	27
Figura 10 - Experimento para obtenção de h_{fs} .	27
Figura 11 - Raios de luz atravessando uma lente.	28
Figura 12 - Diferença das distâncias dos sensores para focar objetos em distâncias diferentes.	29
Figura 13 - Ângulo de visão de uma lente.	30
Figura 14 - Sensor CCD de imagem.	32
Figura 15 - Dois tipos de sensores CMOS.	32
Figura 16 - Representação da Imagem Digital em forma de matriz.	33
Figura 17 – Dimensões de alguns sensores de câmeras digitais comerciais.	34
Figura 18 - Espectro de cores.	37
Figura 19 - Espectro de cores aditivas.	38
Figura 20 - Imagem em RGB e conversão para o componente Y (tons de cinza).	39
Figura 21 - Mapeamento do tom / Hue.	39
Figura 22 - Espectro de saturação.	40
Figura 23 - Espectro de cores tridimensional.	41
Figura 24 - Variação do número de pixels para distâncias diferentes entre a câmera e o objeto.	42
Figura 25 - Esquema do método proposto.	43
Figura 26 - Câmera com o triângulo com altura estimada e comprimento de fundo da imagem estimada.	46
Figura 27 - (a) Imagem original (RGB) e (b) imagem após uso do limiar de corte (<i>Thresholding</i>)	48
Figura 28 – (a) Erosão e (b) dilatação	49

Figura 29 – (a) Imagem original e (b) imagem processada com várias ferramentas.	49
Figura 30 – (a) Imagem captada pela câmera, (b) após uso de limiar de corte e (c) após retirada de alvos indesejados	50
Figura 31 - Achando o alvo através das bordas	50
Figura 32 - Valores máximos e mínimos para o objeto.	51
Figura 33 - Caixa de contorno 2D.	51
Figura 34 - Imagem processada.	52
Figura 35 - Centro do Alvo definido pelo cruzamento das retas.	52
Figura 36 - Centro do alvo definido pela média dos valores de X e Y da caixa de contorno.	53
Figura 37 - Tela geral do <i>software</i>	57
Figura 38 - Fotos capturadas para análise da distorção da lente da câmera.	58
Figura 39 - Processo de extração dos parâmetros da lente.	59
Figura 40 - Resultado das deformações radial (a), tangencial (b) e completa (c) da lente.	59
Figura 41 – Bloco responsável pela obtenção da relação unidade/pixel	61
Figura 42 - Uso de ferramentas de segmentação para extração das posições dos alvos	62
Figura 43 – Sistema experimental de medidas de distâncias	65
Figura 44 - Imagem mais distante e mais próxima à câmera.	66
Figura 45 - Valores das distâncias estimadas para h_2 variável	66
Figura 46 - Valores das distâncias estimadas para h_1 variável	67
Figura 47 - Diâmetro do alvo estimado para h_1 fixo e erro percentual	69
Figura 48 - Diâmetro do alvo estimado para h_2 fixo e erro percentual	70
Figura 49 – Sistema de medição com micrômetro para testes estáticos	74
Figura 50 - Incremento estimado do deslocamento do alvo na haste do micrômetro em passos de 0,5 mm e o erro do valor estimado	75
Figura 51 - Modelo do prédio de dois andares	76
Figura 52 - Sistema para medição do prédio	77
Figura 53 - Comparação entre o sinal de referência e os sinais medidos no domínio do tempo e no domínio da frequência.	78
Figura 54 - Representação do modelo em espaço de estados estocástico	85
Figura 55 – Sistema de medição com marcação para realização da análise modal	92
Figura 56 – Réplica do sinal do terremoto El Centro usado como excitação sísmica - (a) e sinal deslocamento obtido com a integração do sinal de aceleração e usado como referência para o motor no controlador PD – (b).	93
Figura 57 – (a) Imagem original e (b) imagem cortada na região de interesse.	95

Figura 58 - <i>Threshold</i> - (a), Erosão – (b), Dilatação – (c) e cálculo dos centroides - (d)	95
Figura 59 - Comparação entre os sinais da excitação sísmica	96
Figura 60 - Pontos nomeando os adesivos.	97
Figura 61 - Todos sinais medidos simultaneamente no prédio.	97
Figura 62 - Sinal no tempo e sua respectiva densidade espectral medidos no ponto 23 da estrutura.	98
Figura 63 - Interface gráfica de parâmetros de entrada utilizados na IES.	99
Figura 64 – Diagrama de estabilização.	100
Figura 65 - Modos extraídos da estrutura do prédio em escala reduzida	101

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Dimensões padronizadas dos sensores.	34
Tabela 2 - Dados da câmera referentes as distâncias focais.	36
Tabela 3 - Resoluções e taxas de aquisição da câmera.	36
Tabela 4 – Valores das posições dos centroides dos alvos.	54
Tabela 5 - Rótulo dos alvos.	56
Tabela 6 - Ordenando o movimento dos alvos.	56
Tabela 7 - Comparação das séries de medidas de distâncias.	68
Tabela 8 - Comparações entre as séries das medidas dos diâmetros dos alvos	70
Tabela 9 – Diâmetros estimados para diferentes distâncias	74
Tabela 10 - Valores RMS do sinal senoidal	78
Tabela 11 - Valores RMS do sinal de referência e dos sinais medidos com o encoder e com a câmera.	96
Tabela 12 - frequências naturais e fatores de amortecimento da estrutura.	101

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	15
1.1	Objetivo deste trabalho	18
1.2	Contexto da pesquisa	19
1.3	Descrição da estrutura deste trabalho	19
2	CONCEITOS BÁSICOS E FUNDAMENTAÇÃO DE IMAGENS DIGITAIS	20
2.1	Estrutura de uma câmera digital	20
2.1.1	Objetiva	21
2.1.2	Distância focal	24
2.1.3	Ângulo de visão	28
2.1.4	Sensores	31
2.2	Modelos de cores	37
2.2.1	RGB	37
2.2.2	Tons de cinza	38
2.2.3	HSB	39
3	MÉTODO DE MEDIDA DE DESLOCAMENTO UTILIZANDO A VARIAÇÃO EM PIXELS DA POSIÇÃO DO OBJETO NA IMAGEM.....	42
3.1	Variação do tamanho do alvo na imagem	42
3.2	Obtenção da distância da câmera ao objeto	43
3.3	Relação entre unidade de comprimento e pixel	46
3.4	Identificação da posição do alvo na imagem	47
3.4.1	Separação do Alvo da Cena	47
3.5	Identificação do centro do alvo através da caixa de contorno	49
3.5.1	Cálculo do centro do alvo	52
3.6	Rastreamento de objetos	53
4	APRESENTAÇÃO DO SOFTWARE IMPLEMENTADO	57
4.1	Obter curvas de distorções da lente	58

4.2 Medida de deslocamento	60
4.2.1 Obtenção da relação unidade de comprimento por pixel	61
4.2.2 Obtenção do deslocamento do alvo	62
5 VALIDAÇÃO DA METODOLOGIA APLICADA A TESTES ESTÁTICOS E DINÂMICOS	64
5.1 Medida da distância entre a câmera e o objeto alvo	64
5.1.1 Algumas considerações a respeito da determinação da distância estimada entre a câmera e o alvo e do valor estimado da relação unidade/pixel	71
5.2 Medida de deslocamento estático	73
5.3 Medida de deslocamento dinâmico	76
5.3.1 Estrutura do prédio de dois andares.....	76
5.3.2 Aparato experimental	77
5.3.3 Medida de deslocamento da excitação na base do prédio	78
5.4 Algumas considerações a respeito dos testes realizados neste capítulo	79
6 ANÁLISE MODAL DE UM PRÉDIO EM ESCALA REDUZIDA	81
6.1 Análise Modal Experimental	82
6.1.1 Princípios básicos da Identificação Estocástica de Subespaço - IES	83
6.2 Medidas de deslocamento do prédio	91
6.2.1 Processamento do vídeo e obtenção dos deslocamentos	93
6.2.2 Avaliação e caracterização da qualidade do sinal medido	96
6.3 Análise modal do prédio em escala reduzida com base apenas na resposta.....	98
6.3.1 Identificação dos parâmetros do modelo	99
7 CONCLUSÕES	102
7.1 Sugestões para trabalhos futuros	103

1 INTRODUÇÃO

Nas últimas décadas, as áreas de processamento de imagens e visão por computador vêm apresentando expressivo desenvolvimento, tal crescimento pode ser detectado na área acadêmica, onde o assunto é objeto de pesquisas, teses e dissertações nas mais importantes universidades brasileiras e mundiais, na esfera industrial onde a cada dia aumenta o número de empresas que produzem, comercializam e utilizam soluções de processamento de imagens em seus processos e na vida cotidiana, com as aplicações multimídia sendo executadas em computadores e até mesmo em celulares na forma de aplicativos.

O uso de técnicas computacionais de aprimoramento de imagens teve seu grande aumento no *Jet Propulsion Laboratory* (Pasadena, Califórnia - EUA) em 1964, quando imagens da lua transmitidas pela sonda *Ranger* eram processadas por computador para corrigir vários tipos de distorção inerentes à câmera de TV acoplada à sonda. Estas técnicas serviram de base para métodos aprimorados de realce e restauração de imagens de outros programas espaciais posteriores, como as expedições tripuladas da série Apollo (FILHO, 1999).

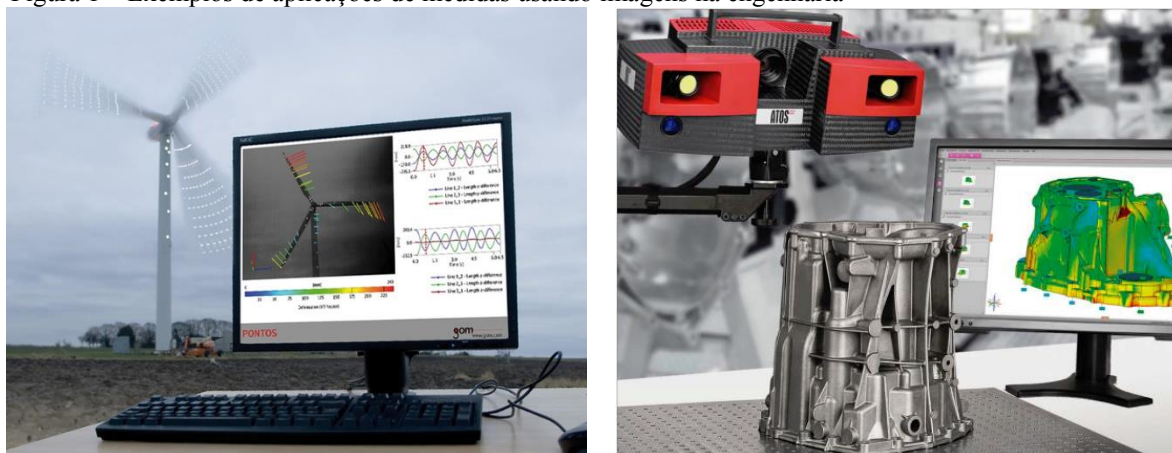
De 1964 aos dias atuais, a área de processamento de imagens vem apresentando crescimento expressivo e suas aplicações permeiam quase todos os ramos da atividade humana. Segundo FILHO (1999), as aplicações de processamento de imagens podem ser encontradas em várias áreas. Na medicina, o uso de imagens no diagnóstico médico tornou-se rotineiro e os avanços em processamento de imagens vêm permitindo tanto o desenvolvimento de novos equipamentos quanto a maior facilidade de interpretação de imagens produzidas por equipamentos mais antigos, como por exemplo, raios-X. Em biologia, a capacidade de processar automaticamente imagens obtidas de microscópios, por exemplo, contando o número de células de certo tipo presentes em uma imagem, facilita a execução de tarefas laboratoriais com alto grau de precisão e repetitividade. O processamento e a interpretação automática de imagens captadas por satélites auxiliam os trabalhos nas áreas de geografia, sensoriamento remoto, geoprocessamento e meteorologia, dentre outras. Técnicas de restauração de imagens auxiliam arqueologistas a recuperar fotos borradas de artefatos raros, já destruídos. O uso de robôs dotados de visão artificial em tarefas, tais como, controle de qualidade em linhas de produção aumenta a cada ano, num cenário de crescente automação industrial. Inúmeras outras áreas tão distintas como astronomia, segurança e publicidade para citar apenas alguns exemplos, vêm sendo beneficiadas com os avanços nas áreas de processamento de imagens e visão por computador.

Quando se tenta dar a uma máquina o sentido da visão, a preocupação é como uma cena deve ser interpretada. Assim, a visão computacional trata de um conjunto de eventos que operam em sequência desde a captura da imagem de uma cena, passando pela sua decodificação através de um processamento da imagem, de onde são extraídas as informações importantes para a interpretação de algum evento, até a execução de alguma ação de interação com o evento.

O processamento e a análise de imagens criam uma ciência que permite manipular, analisar e modificar imagens digitais, a partir de procedimentos que envolvem morfologia matemática (FACON, 1996; HASAN E KARAM, 2000); técnicas para o processamento de informação geométrica e estatística (SHEN, 2000); análise de componentes principais (ZHANG, 2001); algoritmos de processamento de imagens implementados em hardware (SPITZ, 2000); paradigmas da inteligência computacional, tais como redes neurais (AUGUSTEIJN, 1996), algoritmos genéticos (WANG, 2001), lógica fuzzy (CHENG, 2000), entre outros. Assim, os sistemas de visão artificial contemplam um conjunto de técnicas e metodologias que dão suporte ao desenvolvimento de produtos confiáveis ou processos suficientemente eficientes, que possam ser empregados em situações práticas de um ambiente de laboratório ou industrial.

Conforme discutido em Junior (2008), a indústria em geral tem interesse em ter seus processos automatizados e muitas ferramentas matemáticas e computacionais vêm sendo propostas. Dois exemplos de aplicações são ilustrados na Figura 1, dos quais o primeiro mostra uma análise do comportamento dinâmico da estrutura de um gerador eólico e a segunda mostra um sistema de medidas em três dimensões (3D) de superfícies complexas.

Figura 1 – Exemplos de aplicações de medidas usando imagens na engenharia



Fonte: ADOLF (2011)

Devido às particularidades e ao conjunto de restrições da aplicação, as tecnologias usadas em visão computacional são direcionadas a solução de um problema específico, adaptando o conjunto de ferramentas matemáticas e os sistemas computacionais para a resolução de cada tipo de problema. Ainda não é possível ter um sistema de visão genérico que possa ser usado em vários propósitos, mas a aplicação de várias técnicas de modo escalonado permite dar solução aos problemas mais complexos.

Problemas de medida de deslocamento com sensores de contato/não contato são comuns em todas as áreas da engenharia, para os mais variados tipos de aplicações. Técnicas de medidas de não contato são de suma importância em situações em que se deseja medir o movimento de um determinado objeto e que o contato físico entre o instrumento de medição e o objeto pode influenciar as propriedades do sistema e interferir nos valores medidos ou em casos em que o acesso físico é difícil, como sistemas energizados, temperatura elevada entre outros.

Geralmente, dois métodos tradicionais de medidas de movimento de não contato são constantemente empregados: os métodos de medida por ultrassom (CARULLO; PARVIS, 2001; SONG; TANG, 1996) e por laser (SVIRDOV; STERLYAGOV, 1994). Estes métodos de medida com base na teoria de reflexão e contagem de pulsos de ondas, realizam medidas dinâmicas a partir do tempo gasto para que os pulsos enviados reflitam em uma barreira e retornem ao instrumento, no entanto, a precisão destes métodos dependem fortemente da reflexão da superfície medida, caso a superfície medida tenha uma superfície com reflexão pobre, então a medida também será pobre. Outros aspectos importantes de se notar é o número de pontos que podem ser medidos simultaneamente e o custo de cada técnica, pois sensores com base de funcionamento em ultrassom são mais eficientes medindo apenas um alvo de interesse, enquanto que os sensores laser atuais podem mapear uma região assim como uma câmera fotográfica, em contrapartida, o custo dos sensores laser de boa qualidade e precisão são relativamente altos comparados às câmeras.

Os sistemas de visão podem operar com uma ou mais câmeras, que podem ser móveis ou fixas (MOTTA, 2002). Embora seja possível se ter uma ideia do mundo 3D usando uma única imagem, por um processo direcionado de segmentação (RYOO, 2004), procedimentos mais consistentes podem ser obtidos a partir de duas imagens. Desta forma, a utilização de câmeras digitais para medidas de movimento tem aumentado expressivamente nos últimos anos (MIWA et al. 2000; EGAMI et al. 2001; CANO et al. 2007; MATAIX et al. 1999).

Métodos de captura de imagens têm sido propostos para a medição de distância usando câmeras digitais, que possuem um sensor *Charge Coupled Device* (CCD) ou *Complementary Metal Oxide Semiconductor* (CMOS), que são dispositivos sensíveis à luz (MIWA et al. 2000;

EGAMI et al. 2001). Estes métodos, no entanto, exigem geralmente duas câmeras posicionadas em diferentes posições para capturar duas imagens diferentes para análise posterior. O reconhecimento de padrões e análise de imagem (KANADE et al. 1995; TANAKA et al, 1998) de cada quadro se faz necessário para extrair características das imagens e obter a medida de distância a partir delas. Deste modo uma enorme capacidade de armazenamento e velocidade de processamento deve ser aplicada para o sistema assim estabelecido, inevitavelmente resultando em desvantagens em termos de complexidade do sistema, velocidade de processamento e custo de implantação. Como resultado, o desempenho das medições em tempo real através do reconhecimento de padrões e métodos de análise de imagem não são satisfatórios, devido à restrição de velocidade (LIMA, 2013).

Hsu et al. (2009) publicou um artigo onde propôs uma técnica de medida de distância com imagens utilizando apenas uma câmera como alternativa aos métodos de medidas com imagens que necessitam de duas câmeras. Estabelecendo uma relação entre um deslocamento aplicado à câmera e a variação do número de pixels do objeto nas imagens capturadas em duas posições diferentes, pode-se estimar a distância entre a câmera e o objeto.

Utilizando a abordagem de Hsu, este trabalho apresenta uma proposta de uma metodologia para realizar a medida de deslocamento de múltiplos objetos simultaneamente através do uso de uma câmera digital. O método proposto utiliza a distância estimada entre a câmera e o objeto obtida através do método de Hsu a fim de obter um valor em uma dada unidade de medida para cada pixel da imagem, que também substitui a tradicional forma de calibração utilizando um objeto de referência com medidas padrão na imagem.

Desta forma, através de um sistema de medição de distâncias utilizando uma única câmera, objetiva-se implementar um método de medidas de deslocamentos para múltiplos objetos simultaneamente, o qual pode ser empregado para diversas áreas de interesse da engenharia mecânica, como por exemplo, análise de vibrações, deformação de materiais e análise modal operacional baseada somente nos dados de resposta do sistema.

1.1 Objetivo deste trabalho

Este trabalho tem como objetivo principal o desenvolvimento e a implementação de uma metodologia de medidas de deslocamento de um ponto ou um conjunto de pontos de um dado alvo utilizando como sensor de deslocamento sem contato uma câmera digital. Sendo que o deslocamento do objeto alvo é obtido a partir da captura de seu movimento (no vídeo) e

posterior processamento e análise da sequência de imagens. A variação do número/posição de pixels do alvo na sequência de imagens é utilizada para o cálculo do deslocamento.

1.2 Contexto da pesquisa

Este trabalho é desenvolvido no Grupo de Materiais e Sistemas Inteligentes (GMSINT) da Universidade Estadual Paulista (Unesp) e encontra-se no contexto das atividades de pesquisa do grupo, que atualmente busca o desenvolvimento e a implementação de técnicas de medição de deslocamentos e vibrações com sensores do tipo CCD e CMOS utilizados em câmeras digitais e web câmeras. O trabalho visa o desenvolvimento de um sistema simples de medição com custo inferior e de fácil aplicação, visto que a maioria dos sistemas e *softwares* utilizados, principalmente, para medidas de vibrações são sofisticados e acessíveis apenas para grandes empresas. Consequentemente, a técnica posposta e implementada poderia ser uma alternativa de menor custo e mais acessível.

1.3 Descrição da estrutura deste trabalho

No capítulo 2 são apresentados os conceitos referentes a formação e obtenção das imagens digitais e são apresentadas algumas propostas de como obter alguns parâmetros intrínsecos das câmeras que são importantes para o método proposto. No capítulo 3 é apresentada a metodologia proposta para a medida de deslocamento de um alvo utilizando a variação da posição dos pixels em uma sequência de imagens. No capítulo 4 são apresentadas as principais e mais simples técnicas de extração de parâmetros da imagem, bem como a identificação da posição dos alvos em uma dada cena e como rastreá-los em uma sequência de imagens. No capítulo 5 é descrito sucintamente o funcionamento do *software* desenvolvido para aplicações de medida de deslocamento. No capítulo 6 são apresentados os experimentos realizados como métodos de validação da metodologia proposta, bem como seus resultados e comentários. No capítulo 7 é descrito o método de identificação de parâmetros modais de uma estrutura utilizando somente a resposta de um sistema, o qual foi utilizado para obter os parâmetros modais de uma estrutura predial de laboratório em escala reduzida. As conclusões deste trabalho são apresentadas em seguida, juntamente com as propostas para trabalhos futuros e por fim, é apresentado as referências bibliográficas.

2 CONCEITOS BÁSICOS E FUNDAMENTAÇÃO DE IMAGENS DIGITAIS

Este capítulo trata sobre os conceitos de estruturas e funcionamento das câmeras digitais compactas, a fim de fornecer subsídios e as informações básicas necessárias para a compreensão e desenvolvimento do trabalho. Para melhor compreensão da proposta será apresentada uma síntese sobre formação de imagens digitais. Dentre os assuntos abordados, são discutidas as principais características da câmera obtidas a partir das características físicas dos seus principais elementos, que são as lentes e o sensor de imagem. Por fim, são abordados os modelos de cores utilizados na imagem, que são formas padronizadas de representação de cores através de um *hardware*.

2.1 Estrutura de uma câmera digital

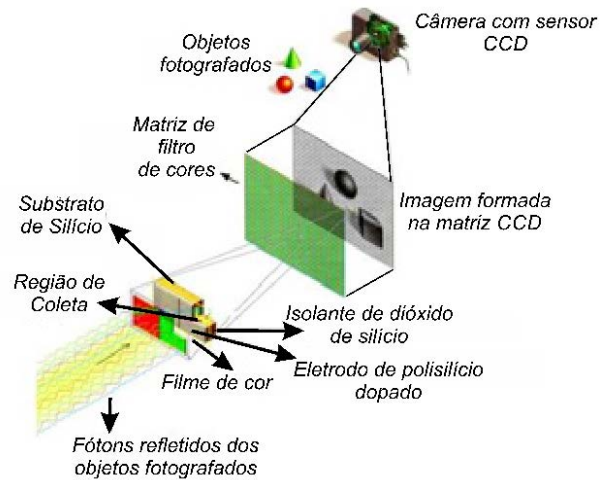
As câmeras digitais atuais possuem complexos circuitos eletrônicos que são capazes de realizar operações que facilitam e simplificam a captura de uma boa imagem. Ferramentas de processamento de imagem veem sendo empregadas nestes circuitos a cada nova geração de câmeras, como por exemplo o foco automático, ajuste automático de brilho e contraste, controle de vibração no instante de captura da imagem, detecção de sorrisos ou faces (padrões) e várias outras funcionalidades que são liberadas pelos fabricantes das câmeras aos poucos no mercado. Mesmo com a facilidade do uso destas funcionalidades, é necessária a compreensão de como estes ajustes são realizados.

As câmeras digitais são compostas basicamente de um conjunto de lentes, um sensor de captura de luminosidade, processador e mídia de armazenamento de dados. Alguns destes itens interferem diretamente na qualidade da imagem em aquisição e serão abordados separadamente nos tópicos seguintes.

Os atuais sensores que “enxergam” uma imagem podem ser entendidos como uma matriz $M \times N$ em que cada elemento é um micro sensor de luz, que recebe um sinal luminoso e o converte em sinal o converte em sinal elétrico. Cada elemento desta matriz contém um valor digital proporcional à intensidade à intensidade luminosa sofrida naquela posição. Cada posição desta recebe o nome de *pixel*, uma abreviação para uma abreviação para *Picture element*, que define a menor informação em uma imagem. Na

Figura 22 é representada a obtenção de uma imagem digital em um sensor.

Figura 2 - Obtenção de imagem através de uma câmera digital.



Fonte: Adaptado de Carvalho (2003)

Para melhor compreensão de como são formadas as imagens digitais, os tópicos seguintes discutem detalhadamente a função dos principais componentes de uma câmera digital, as lentes e o sensor.

2.1.1 Objetiva

Uma objetiva é uma lente óptica ou conjunto de lentes acoplada em uma câmera a fim de focar a luz emitida e refletida por um objeto e de reproduzir em uma mídia capaz de armazenar uma imagem quimicamente (filme) ou eletronicamente (sensores). Nas Figura 3a e 3b são mostradas uma objetiva cortada ao meio, tornando possível a visualização do complexo mecanismo de acionamento das lentes em diferentes posições.

Figura 3 - Detalhes internos de uma objetiva.



(a)
Fonte: Trotta (2013)

(b)

As lentes empregadas nas câmeras digitais podem ser permanentemente fixas ou cambiáveis, sendo a primeira uma objetiva que possui apenas uma distância entre a posição do centro óptico da lente e o sensor, e a segunda tem lentes que podem variar estas distâncias.

As câmeras digitais compactas atuais, comumente utilizam um conjunto de lentes que possuem distâncias entre o centro óptico da lente e o sensor ajustáveis.

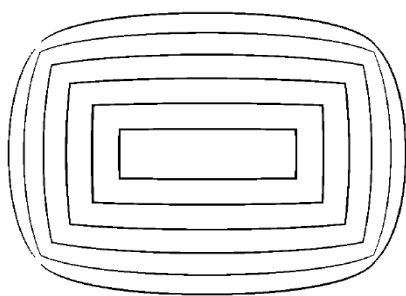
A princípio, uma única lente convexa simples é suficiente para focar a luz da imagem no sensor, mas na prática um conjunto de lentes se torna necessário a fim de corrigir imperfeições ópticas que aparecem nas imagens. Algumas imperfeições estarão presentes em qualquer sistema de lentes.

2.1.1.1 Distorções das lentes

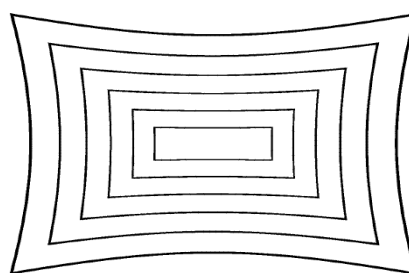
As lentes podem conter diferentes defeitos de fabricação que levam a distorções não-lineares nas imagens lineares nas imagens capturadas, como as distorções com efeitos barril e almofada (como são comumente chamadas estas distorções do tipo **radial**), sendo que a distorção do tipo barril faz com que as linhas retas pareçam estar encurvadas para fora da imagem, e a distorção do tipo almofada faz com que as linhas retas pareçam estar encurvadas para dentro da imagem (LOBÃO, 2004), conforme (LOBÃO, 2004), conforme ilustradas nas

4a e 4b, respectivamente.

Figura 4 – (a) Efeitos “barril” e (b) “almofada” das lentes.



(a)

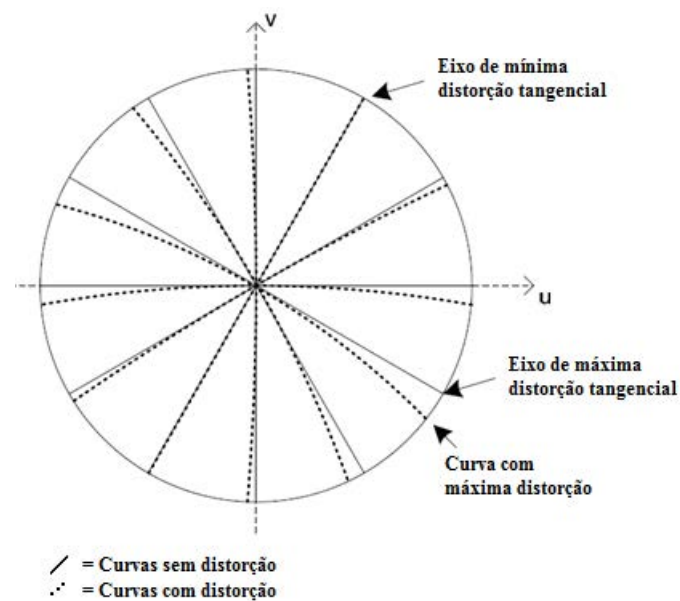


(b)

Fonte: Lobão (2004)

Outro tipo de distorção é a **tangencial** (**Erro! Fonte de referência não encontrada.5**), que é essencialmente decorrente de fenômenos físicos normalmente designados como “prisma fino” e/ou “descentralização”, que são decorrentes da dispersão dos centros ópticos efetivos em diferentes regiões da lente ou conjunto de lentes utilizadas (LOBÃO, 2004).

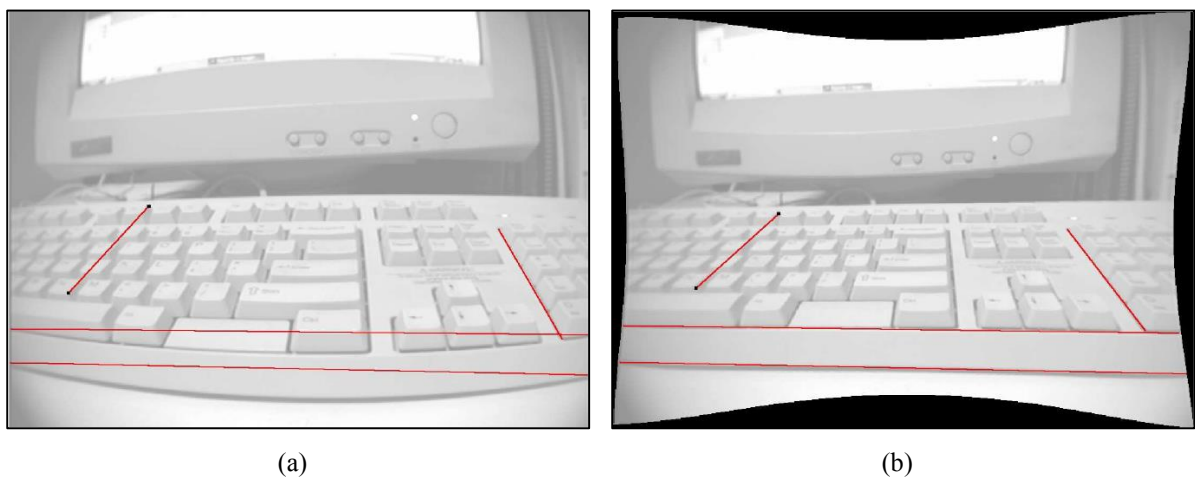
Figura 5 - Efeito de distorção tangencial de uma lente



Fonte: Adaptado de Lobão (2004)

Na **Erro! Fonte de referência não encontrada.6a** é apresentada uma imagem original, com distorções, e na Figura 6b é apresentada a mesma imagem corrigida, ou seja, distorcida.

Figura 6 - Imagem original com distorções e imagem distorcida.



Fonte: Lobão (2004)

Pode-se perceber que quanto mais próximo à borda da imagem um objeto alvo está, maior será o erro da posição visualizada do alvo com relação às posições centrais. A forma de correção das distorções das imagens neste trabalho é discutido na seção 5.1.

2.1.2 Distância focal

Antes de definir distância focal, que é um item fundamental no método proposto, é importante conhecer a respeito de imagens virtuais e imagens reais. Para isso, imagine que seja colocado um cubo em frente a um espelho, um observador percebe e reconhece o cubo como estando no local de onde vêm os raios luminosos (refletidos pelo cubo).

O sistema visual processa esta imagem mesmo sendo que os raios luminosos não tenham vindo diretamente do cubo, mas tenham primeiramente sido refletidos em um espelho ou refratados em uma lente. No entanto, para a situação dos raios luminosos do cubo terem sido refletidos ou refratados, o cubo é visto na direção do espelho ou da lente, e sua distância pode ser bem diferente da distância original.

Logo, caso os raios luminosos do cubo sejam refletidos por um espelho plano, o cubo aparecerá atrás do espelho, no entanto, não existe nenhum cubo atrás do espelho, este tipo de imagem é definido como **imagem virtual**, onde ela existe somente no mundo imaginário e não no mundo real. Já a **imagem real**, é aquela que pode ser reproduzida em um plano, como por exemplo, em monitores.

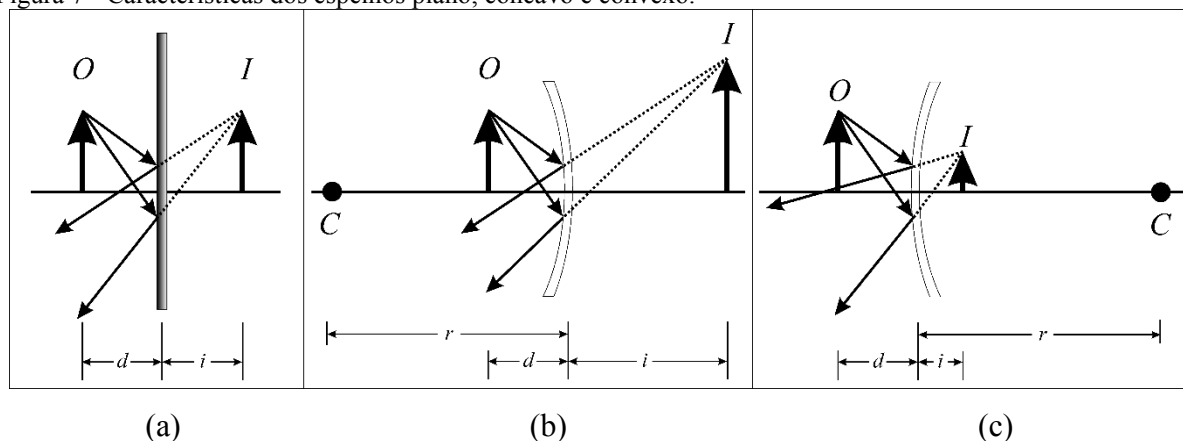
Os espelhos podem ser classificados em espelhos planos, côncavos e convexos e suas características podem ser visualizadas na Figura 7, onde a letra O representa o objeto real, a letra I representa a imagem virtual, a letra d representa a distância entre o objeto real e o centro óptico do espelho, a letra i representa a distância entre a imagem virtual e o centro óptico do espelho, a letra r representa o raio dos espelhos côncavo e convexo e a letra C é o ponto central da circunferência formada pelos espelhos não-plano.

O espelho plano (Figura 7a), como o próprio nome diz, é totalmente plano, o que faz com que o campo de visão seja próximo a 180° e a distância da imagem virtual e o tamanho da imagem virtual são das mesmas dimensões comparadas aos do objeto real.

O espelho côncavo (**Erro! Fonte de referência não encontrada.**7b) tem um leve encurvamento para dentro fazendo com que o campo de visão diminua em relação ao campo de visão de um espelho plano e a distância e o tamanho da imagem virtual aumente.

O espelho convexo (**Erro! Fonte de referência não encontrada.7c**) tem seu encurvamento para fora da superfície do espelho, que faz com que o campo de visão aumente e a distância e o tamanho da imagem virtual diminua.

Figura 7 - Características dos espelhos plano, côncavo e convexo.

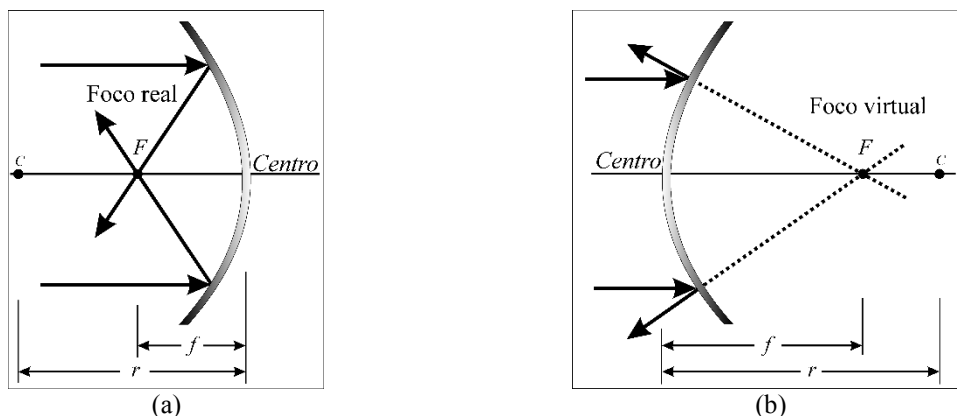


Fonte: Adaptado de Walker (2009)

No caso de espelhos planos, a distância da imagem virtual é sempre igual, em módulo, à distância do objeto. Para o cálculo da distância da imagem virtual em espelhos esféricos, será considerado que a luz emitida pelo objeto é paralela ao eixo central do espelho, devido ao objeto estar situado muito longe do espelho. Quando estes raios são refletidos por um espelho côncavo, **Erro! Fonte de referência não encontrada.8a**, os raios convergem para um mesmo ponto F. Caso seja colocado um plano em F, perpendicular ao eixo central do espelho, uma imagem do objeto será reproduzida no plano. Este ponto F recebe o nome de ponto focal, e a distância deste ponto à superfície do espelho na direção do eixo central é chamada de distância focal.

Já em um espelho convexo, os raios emitidos pelo objeto distante do espelho, ao atingirem são refletidos e divergem, **Erro! Fonte de referência não encontrada.8b**. No entanto, se for feito a projeção dos raios refratados para trás do espelho, os raios convergem para um mesmo ponto, este ponto F é o ponto focal do espelho convexo e a distância do ponto focal à superfície do espelho é a distância focal. Se for colocado um plano em F, nenhuma imagem é projetada no plano, isto se deve pelo fato de que os raios não se cruzam, o que diferencia a distância focal dos espelhos convexos dos côncavos, sendo chamado ponto focal real o ponto focal para espelhos côncavos e ponto focal virtual para espelhos convexos.

Figura 8 - Distância focal do espelho côncavo e convexo.



Fonte: Adaptado de Walker (2009)

Atualmente a distância focal de uma câmera digital é muito utilizada por pessoas que querem filmar ou fotografar objetos à longas distâncias, no entanto, na maioria das vezes, elas o fazem sem saber o que está acontecendo, pois a ação de alterar a distância focal é comumente chamada de *zoom*, e como visto, alterando-se a distância focal (*zoom*) é possível aproximar ou afastar os objetos no plano da imagem, e com isso conseguir efeitos de ampliação ou minimização do objeto a ser capturado.

Vale lembrar que uma objetiva contém várias lentes internamente e quando o *zoom* é acionado, várias lentes podem se movimentar ao mesmo tempo, para frente e para trás, a fim de aproximar ou afastar o objeto da cena e minimizar as distorções intrínsecas das lentes.

Os limites das distâncias focais de uma câmera digital, geralmente são escritas na frente da parte externa da objetiva, na forma de “ $f = X - Y$ mm”, onde X é a menor e Y é a maior distância focal desta objetiva, e a relação entre o maior e o menor valor é conhecido como “vezes de *zoom*”. Por exemplo, assumindo que a objetiva possua o termo “ $f = 28 - 280$ mm” grafado em sua frente externa, isto quer dizer que a distância focal desta câmera para esta objetiva varia de 28 a 280 mm, que resulta em até 10 vezes de *zoom*.

A distância focal da câmera somente será utilizada neste trabalho nos cálculos para obtenção dos ângulos de visão da câmera, sendo que para os demais cálculos onde a distância focal se faz necessária, será utilizada a distância entre a face da câmera e o sensor, que será chamada de h_{fs} (distância entre face e sensor), a diferença entre ambas é representada na **Erro! Fonte de referência não encontrada**.9.

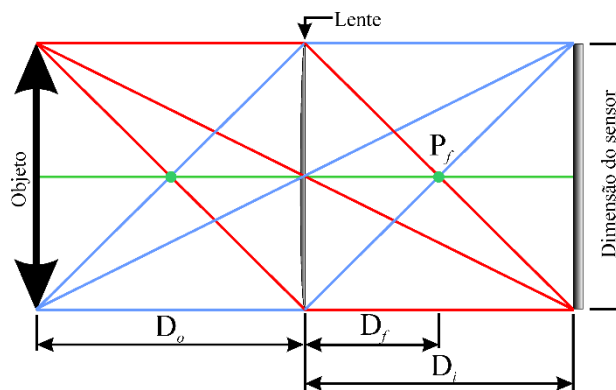
$$h_{fs} = \frac{C_f - 2 \tan(\alpha) h}{2 \tan(\alpha)} \quad (1)$$

A distância focal, além de ampliar e diminuir os objetos em uma imagem, também é utilizada para calcular os valores dos ângulos de visão horizontal e vertical da câmera.

2.1.3 Ângulo de visão

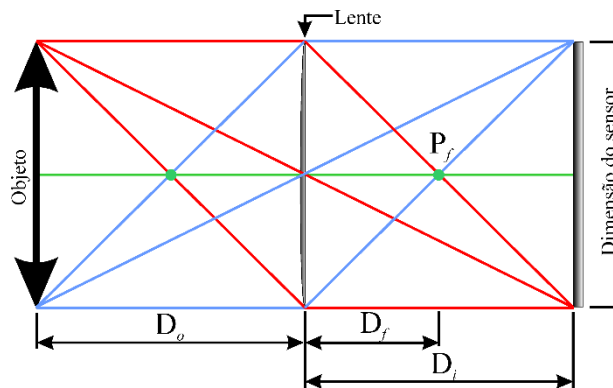
Uma dentre as diversas razões de ter que conhecer a distância focal da câmera é para a determinação do ângulo de visão da câmera para uma dada lente e sensor. Quando os raios de luz passam pelo centro óptico da lente, eles são projetados sobre o sensor na forma de um triângulo,

Figura 11 - Raios de luz atravessando uma lente.



1, que pode ser usado para obter o ângulo de visão da câmera utilizando o teorema de Pitágoras.

Figura 11 - Raios de luz atravessando uma lente.



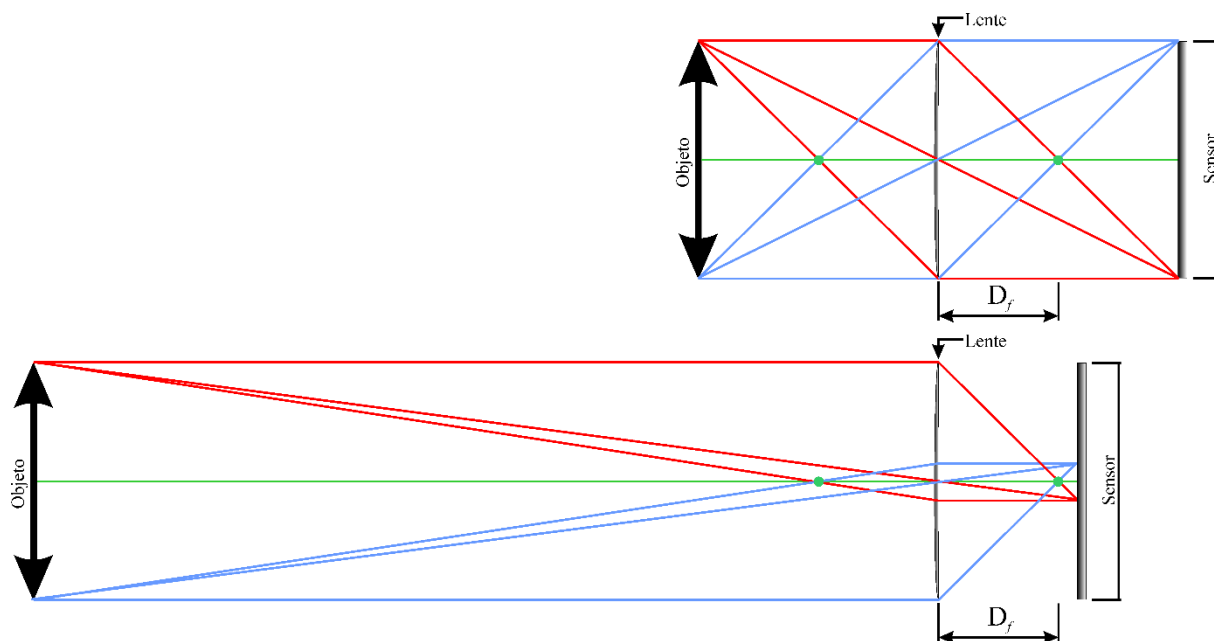
Fonte: Adaptado de Terra (2013)

Define-se então como a base do triângulo o tamanho do sensor (altura ou comprimento) e a altura do triângulo é definida como a distância entre o centro óptico da lente e o sensor. A altura do triângulo pode ser encontrada através da Equação (2) - Equação de Gauss - que descreve a relação entre a distância focal, distância do objeto e a distância da imagem em relação ao centro óptico da lente.

$$\frac{1}{D_f} = \frac{1}{D_o} + \frac{1}{D_i} \quad (2)$$

Nesta equação, D_f é a distância focal, D_o é a distância do objeto real em relação ao centro óptico da lente e D_i é a distância entre o sensor e o centro óptico da lente. Analisando a Equação (2), quanto mais distante do centro óptico estiver o objeto, mais próxima estará sua imagem do ponto focal e vice-versa. Na **Erro! Fonte de referência não encontrada.2** é ilustrado o seguimento de seis raios de luz para duas situações, a primeira com o objeto próximo ao centro óptico da lente e a segunda com o objeto em foco distante do centro óptico da lente.

Figura 12 - Diferença das distâncias dos sensores para focar objetos em distâncias diferentes.



Fonte: Adaptado de Terra (2013)

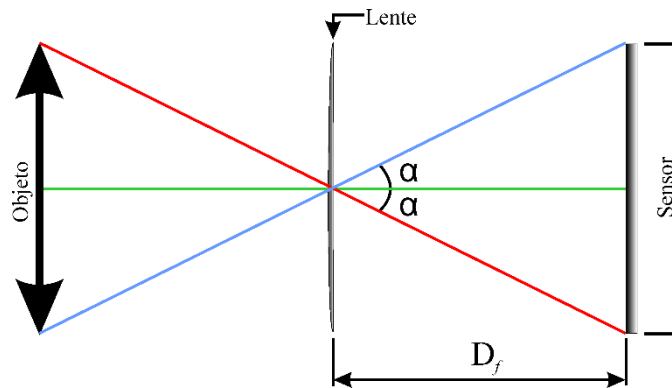
Assim, pode-se dizer que, para obter nitidez em objetos distantes, as lentes da câmera serão posicionadas de forma que o foco imagem fique próximo do sensor, enquanto que para objetos mais próximos pode-se dizer que as lentes da câmera serão posicionadas de forma que o foco imagem fique mais distante do sensor.

Quando a distância entre o objeto fotografado e o centro óptico da lente for muito maior do que a distância focal, a distância entre a mídia e o ponto de foco imagem será muito próxima da distância focal, portanto pode-se calcular o ângulo de visão aproximado de uma lente para um objeto distante a partir da própria distância focal, pois neste caso a diferença entre a distância focal e a distância da imagem em relação ao centro óptico da lente seria insignificante quando aplicada no cálculo do ângulo de visão. Imaginando uma objetiva de distância focal $D_f = 50$ mm e fotografando um objeto a uma distância do centro óptico da lente $D_o = 5$ m pode-se exemplificar uma aplicação da Equação (2).

$$\frac{1}{50} = \frac{1}{5000} + \frac{1}{D_i} \Rightarrow D_i = 50,5mm \quad (3)$$

Deste modo, pode-se perceber que, quando um objeto a ser fotografado está muito distante da câmera, a diferença entre a distância focal e a distância do sensor é muito pequena para afetar significativamente o cálculo do ângulo de visão. De acordo com a **Erro! Fonte de referência não encontrada.**3, pode-se obter o ângulo de visão da câmera α com a Equação (4).

Figura 13 - Ângulo de visão de uma lente.



Fonte: Adaptado de Terra (2013)

$$\alpha = \tan^{-1} \left(\frac{\frac{\text{Altura ou comprimento do sensor}}{2}}{D_f} \right) \quad (4)$$

Sendo o ângulo total de visão da câmera (β) igual a duas vezes o valor obtido na equação anterior, Equação (5).

$$\beta = 2\alpha = 2 \tan^{-1} \left(\frac{\frac{\text{Altura ou comprimento do sensor}}{2}}{D_f} \right) \quad (5)$$

Normalmente o valor aproximado do ângulo de visão é funcional para a grande maioria das condições de medição, a ressalva fica por conta das fotografias próximas ou das macro fotografias. Logo, outras técnicas devem ser empregadas para a obtenção destes valores.

De posse destas relações é possível obter os ângulos de visão vertical, horizontal, diagonal e suas aproximações, em qualquer tamanho de sensor e para qualquer distância focal. Estas relações também deixam claro que quando se varia o tamanho do sensor ou a distância focal, tem-se uma variação do ângulo de visão do conjunto, de forma que quanto maior a distância focal, menor o ângulo de visão e quanto menor as dimensões do sensor, menor o ângulo de visão do conjunto.

Segundo Terra (2013), com o uso intenso das câmeras do formato 35 (que foram dominantes no passado), foi criada uma associação entre distância focal e o ângulo de visão de uma dada lente, isso porque o tamanho da mídia usada era quase sempre o mesmo (as tradicionais películas de 35mm), assim o que produzia as variações no ângulo de visão eram exatamente as mudanças da distância focal, ou seja, no lugar de medir o ângulo de visão de uma dada objetiva criou-se o hábito de associar a ideia de um dado ângulo de visão a uma certa distância focal. Este hábito, consolidado por um longo período de dominância do sistema 35, criou um problema quando foram lançados os equipamentos de fotografia digital, pois cada câmera possuía um tamanho de sensor diferente, derrubando a “padronização” de mídia que existiu por um longo período de tempo. Isso forçou os fabricantes a criarem os fatores de conversão (também chamados de fatores de *Crop*), para que o fotógrafo pudesse estimar o ângulo de visão de sua lente, a partir do ângulo esperado por uma objetiva equivalente no sistema 35.

Alguns fabricantes chegam a indicar as distâncias focais de seus equipamentos na forma de distância focal equivalente em formato 35, isso para viabilizar o entendimento dos ângulos de visão pelos usuários habituados a este padrão. É necessária atenção por parte do usuário para saber se o que está sendo indicado é a distância focal real ou a distância focal equivalente em outro sistema, pois a distância focal real é quem determina fatores como a profundidade de campo e o próprio ângulo de visão da objetiva.

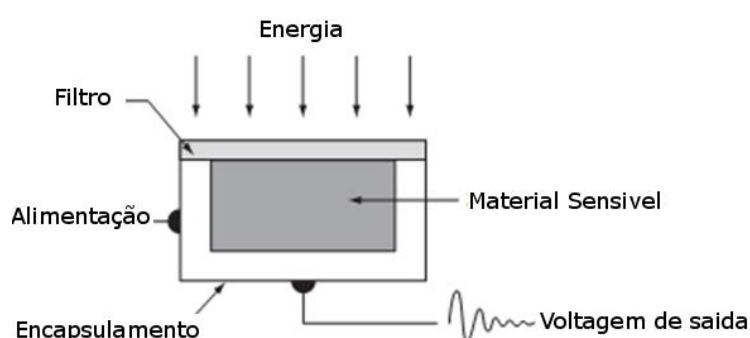
2.1.4 Sensores

Os dois tipos de sensores ópticos mais conhecidos em câmeras digitais é o CCD e o CMOS, ambos são dispositivos sensíveis a luz, mas com algumas diferenças entre si.

CCD é a abreviatura do termo inglês em *Charge Coupled Device*, como tradução próxima se tem Dispositivo de Carga Acoplada, representado na

Figura 14 - Sensor CCD de imagem.14, que denomina a tecnologia básica de operação do sensor, onde são transferidos sinais elétricos referentes a linhas de acordo com a carga de cada ponto da matriz, esta tecnologia é usada há um longo tempo na fabricação de câmeras. Hoje em dia a maioria das câmeras de qualidade possui o CCD como sensor. Estes sensores possuem maior sensibilidade e produzem boa imagem mesmo com baixa luminosidade e geram imagens com baixo nível de ruído embora este sensor tenha um custo elevado de produção (LIMA, 2013).

Figura 14 - Sensor CCD de imagem.

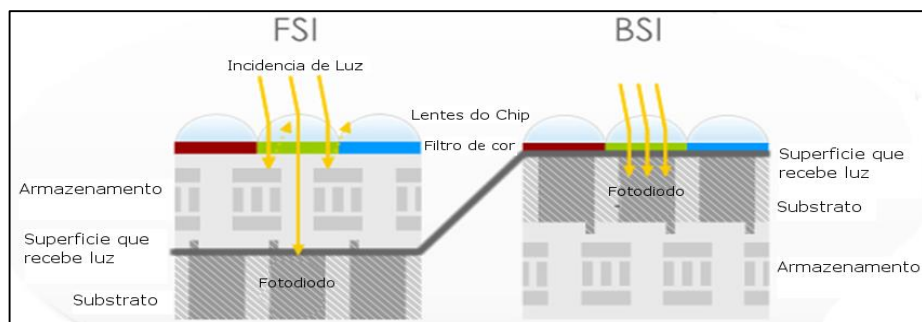


Fonte: Lima (2013)

A tecnologia CMOS (*Complementary Metal-Oxide-Semiconductor* – Semicondutor de Óxido Metálico Complementar) é a tecnologia padrão utilizada na maioria dos chips, circuitos integrados e semicondutores produzidos no mundo, incluindo chips de memórias, microprocessadores e muitos outros. Isto torna a tecnologia muito mais acessível e barato do que a tecnologia CCD. Além do custo relativamente mais baixo devido ao uso de poucos componentes, que acabada gerando um baixo consumo de energia (aproximadamente 100 vezes menos que a tecnologia CCD), câmeras projetadas com CMOS tem o tamanho reduzido e são muito utilizadas em celulares e webcam para pequenas aplicações como vídeo conferência. Dois tipos de arquitetura dos sensores CMOS podem ser observados na **Erro! Fonte de referência não encontrada.**15, o tipo *frontside illumination* (FSI) e o *backside illumination*

(BSI), sendo a principal diferença entre eles a forma que a energia luminosa é transmitida à camada sensível à luminosidade, chamada de “substrato” na figura, onde a energia luminosa é convertida em energia elétrica (APTINA, 2010).

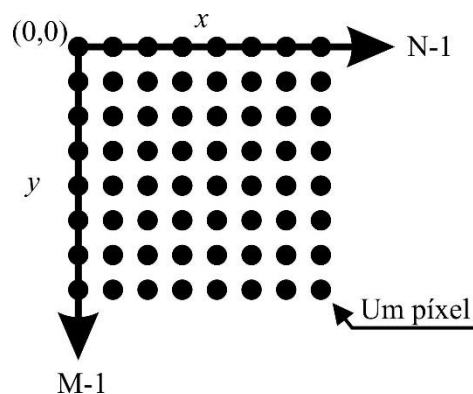
Figura 15 - Dois tipos de sensores CMOS.



Fonte: Lima (2013)

Os dispositivos CCD e CMOS, consistem em uma matriz de sensores de luz que recebe a informação luminosa em cada um de seus elementos, formando uma imagem de acordo com a intensidade dos raios luminosos captados pelo sensor. Na **Erro! Fonte de referência não encontrada.**¹⁶ é representada esquematicamente a formação desta matriz, mostrando a origem e direção da disposição dos micro sensores ou pixels.

Figura 16 - Representação da Imagem Digital em forma de matriz.



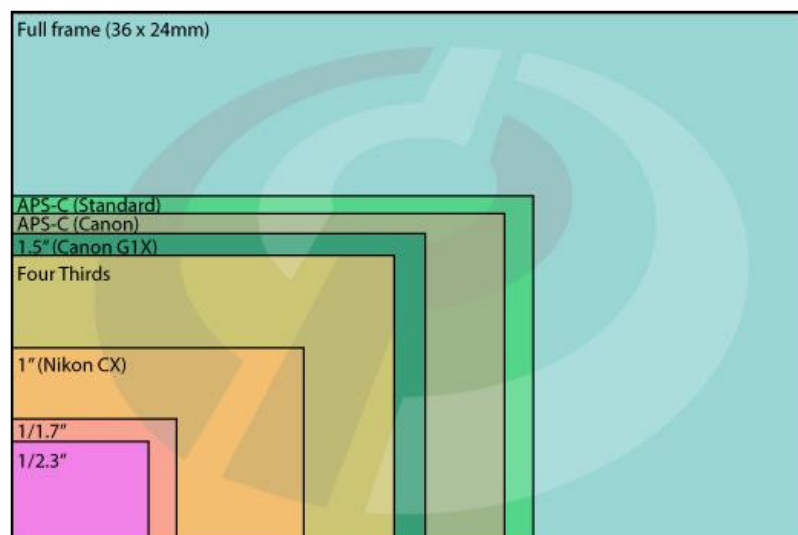
Fonte: Adaptado de Lima (2013)

Os dados digitalizados dos valores da intensidade das cores e luz recebidos em um sensor são enviados ao computador e armazenados ou transmitidos de acordo com o sistema de cores utilizado, como por exemplo: RGB, YUV, CMYK, HSV, HSL ou outros. A escolha do formato correto depende da aplicação para a qual a imagem se destina e será melhor discutida na seção 2.2, que aborda os modelos de cores.

2.1.4.1 Principais características dos sensores CCD e CMOS

Nas câmeras, além das lentes, outra parte responsável pela qualidade das imagens são os sensores, que por sua vez, são dependentes de suas dimensões. Na **Erro! Fonte de referência não encontrada.**¹⁷ são representadas as dimensões dos sensores comumente mais utilizados e na **Erro! Fonte de referência não encontrada.** é apresentado o tamanho físico aproximado de cada um, sendo necessária a verificação no manual do fabricante para consultar as medidas exatas.

Figura 17 – Dimensões de alguns sensores de câmeras digitais comerciais.



Fonte: Velvio (2012)

Tabela 1 - Dimensões padronizadas dos sensores.

Tipo	mm		
	Diagonal	Largura	Altura
1/3.6"	5	4	3

1/3.2"	5,68	4,54	3,42
1/3"	6	4,80	3,6
1/2.7"	6,72	5,37	4
1/2.5"	7,18	5,76	4,29
1/2.3"	7,70	6,16	4,62
1/2"	8	6,40	4,80
1/1.8"	8,93	7,18	5,32
1/1.7"	9,50	7,60	5,70
2/3"	11	8,80	6,60
1"	16	12,80	9,60
4/3"	21,64	17,30	13
1.8"	28,40	23,70	15,70
Filme 35 mm	43,30	36	24

Fonte: Adaptado de Bockaert (2013)

Outro aspecto importante que deve-se analisar é a frequência de amostragem da câmera, ou seja, em quantos quadros por segundo (qps) a gravação deve ser feita, a fim de capturar corretamente os movimentos do sistema.

O processo de amostragem de sinais dinâmicos deve obedecer a critérios específicos. Um sinal que varia continuamente no tempo, com uma frequência máxima $f_{\max}$ ciclos por segundo, só será convenientemente amostrado com uma taxa de amostragem mínima superior a duas vezes $f_{\max}$. Esta taxa de amostragem mínima é denominada de “frequência de Nyquist” (OPPENHEIM, 1989).

Os conhecimentos sobre análise e processamento de sinais para este trabalho é muito importante. A câmera digital utilizada como sensor deve se enquadrar nos parâmetros citados acima, obedecendo às diretrizes de análise e processamento de sinais discutidos.

2.1.4.1 Principais características da câmera deste trabalho

De forma geral, existem diversas configurações que a câmera utilizada neste trabalho pode ser ajustada. Nesta câmera está grafado a distância focal na forma “ $f = 4,24 - 53 \text{ mm}$ ”, isto quer dizer que esta câmera possui uma objetiva, que pode variar a distância focal de 4,24 a 53 mm e que possui 12,5 vezes de *zoom*. Deve-se notar que esta faixa de distâncias focais não está no formato 35 mm, são as medidas reais.

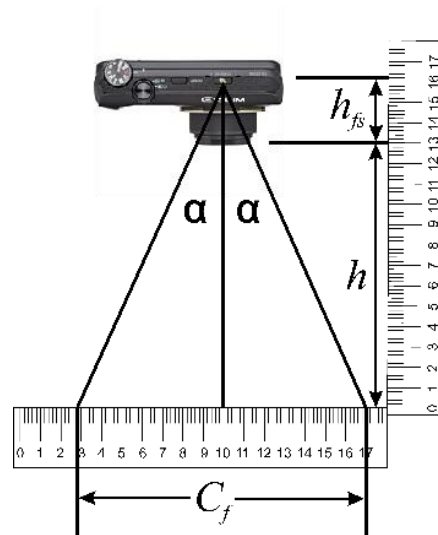
Entretanto, as opções de ajuste da distância focal é apresentada ao usuário no formato 35 mm, diferente da forma em que está grafado na frente da câmera.

Como a distância focal é um dos termos que são utilizados para o cálculo do ângulo de visão da câmera, deve-se convertê-la do formato 35 mm para a distância focal real, que utiliza as dimensões reais do sensor.

O sensor utilizado neste trabalho é do tipo 1/2.3" (6,16 x 4,62 mm) e quando associado a objetiva que possibilita uma distância focal variável de 4,24 à 53 mm pode-se obter os valores dos ângulos de visão para cada distância focal da câmera.

Quando a distância focal é alterada pelo usuário, são assumidas algumas posições fixas de distância focal, que ficam dentro da faixa de ajuste da objetiva. Na **Erro! Fonte de referência não encontrada.** são apresentadas as opções das distâncias focais disponíveis na câmera, que são apresentadas no formato 35 mm, e sua conversão para distância focal real, a distância calculada entre face da câmera e o sensor (h_{fs}) (obtida através do experimento da

Figura 10 - Experimento para obtenção de h_{fs} .



10 e calculada através da Equação 1) e por fim, os ângulos de visão calculados horizontais e verticais.

Tabela 2 - Dados da câmera referentes as distâncias focais.

Distância Focal										
Filme 35 mm	24	25	28	30	33	38	40	47	52	57
Real mm	4,24	4,42	4,95	5,30	5,83	6,71	7,07	8,30	9,19	10,07
h_{fs} mm	10,64	8,09	9,04	7,37	4,88	8,81	6,52	11,70	14,65	17,51
Ângulo X (°)	72,08	69,87	63,90	60,41	55,80	49,36	47,17	40,76	37,13	34,07

Ângulo Y (°)	56,43	54,51	49,40	46,46	42,60	37,44	35,69	30,64	27,82	25,46
Filme 35 mm	63	68	78	86	99	110	123	137	151	166
Real mm	11,13	12,01	13,78	15,19	17,50	19,43	21,73	24,20	26,68	29,33
h_{fs} mm	20,86	22,66	19,37	27,51	40,20	43,31	49,41	60,95	66,39	74,76
Ângulo X (°)	30,98	28,80	25,24	22,96	20	18,04	16,16	14,53	13,19	12,01
Ângulo Y (°)	23,10	21,45	18,75	17,03	14,80	13,35	11,95	10,74	9,75	8,87

Filme 35 mm	182	200	218	240	300
Real mm	32,15	35,33	38,51	42,40	53
h_{fs} mm	84,92	84,98	148,70	110,20	234
Ângulo X (°)	10,96	9,98	9,16	8,32	6,66
Ângulo Y (°)	8,09	7,37	6,76	6,14	4,92

Fonte: Elaborado pelo autor

Percebe-se que quanto maior a distância focal, menor o ângulo de visão tanto para a coordenada X quanto para a coordenada Y.

Após selecionar qual distância focal será utilizada, baseado no ângulo de visão necessário para cobrir a área onde ocorrerá a aquisição das imagens, deve-se notar a frequência de amostragem das imagens da câmera, sendo apresentado na Tabela 3, os valores disponíveis para a câmera deste trabalho.

Tabela 3 - Resoluções e taxas de aquisição da câmera.

Nomenclatura	Resolução	Quadros por segundo
FHD	1920x1080	30
HD	1280x720	15
STD	640x480	30
HS 1000	224x60	1000
HS 480	224x160	480
HS 240	512x384	240
HS 120	640x480	120
HS 30-240	640x480	30 e 240 ¹
HS 30-120	640x480	30 e 120 ¹

Fonte: Elaborado pelo autor

(1) É possível alterar a taxa de aquisição do vídeo durante a gravação.

Nota-se que para as funções de alta velocidade (com a nomenclatura iniciada por HS) quanto maior a frequência de aquisição das imagens, menor a resolução das mesmas. Há as opções de aquisição com resoluções melhores (FHD e HD – do inglês *Full High Definition* e *High Definition*) em baixas frequências de aquisição e também há as opções de dupla frequência de aquisição, onde em um único vídeo, a aquisição pode ser feita em baixa frequência em um trecho e em alta frequência em outro trecho.

2.2 Modelos de cores

É importante a compreensão de como cada cor é descrita e empregada para diferentes aplicativos e equipamentos discretos. Após o sensor capturar a imagem, os valores de cada pixel são transferidos ao processador onde estes sinais são convertidos para um modelo de cor. Os vários dispositivos existentes trabalham com linguagens próprias que utilizam as cores a partir de modelos preestabelecidos, por isso estes modelos devem ser selecionados corretamente. Os mais utilizados em processamento de imagens são: RGB (*Red*, *Green* e *Blue*), Tons de Cinza e HSB (*Hue*, *Saturation* e *Brightness*).

2.2.1 RGB

O espectro de cores pode ser visto na **Erro! Fonte de referência não encontrada.**18 e a partir dele é obtido vários outros modelos.

Figura 18 - Espectro de cores.



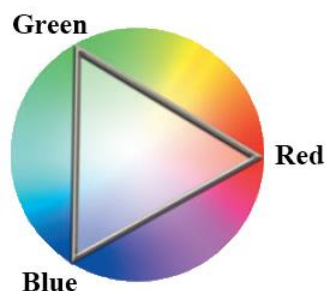
Fonte: Keese (2012)

O modelo de cores RGB é composto pelas cores vermelha (*red*), verde (*green*) e azul (*blue*) e as cores são descritas em valores de intensidade de luz para cada pixel. O valor de intensidade para cada pixel varia de 0 a 255, isto porque cada cor é representada computacionalmente por 8 bits, logo, obtém-se 256 (2^8) níveis de intensidade de cores para cada componente R, G e B. Este modelo de cor é denominado aditivo por adicionar o total (255) de todas as três cores para se obter a luminosidade máxima, O RGB é utilizado por dispositivos que trabalham com luz como scanners, máquinas digitais, gravadores de filme/cromos, monitores e projetores.

Figura 19 - Espectro de cores aditivas.

9. O RGB é utilizado por dispositivos que trabalham com luz como scanners, máquinas digitais, gravadores de filme/cromos, monitores e projetores.

Figura 19 - Espectro de cores aditivas.



Fonte: Adaptado de Keese (2012)

Para gerar uma determinada cor utilizando este modelo, atribui-se valores para cada um dos componentes R, G e B. Para gerar uma cor avermelhada pode-se atribuir o valor de 240 para R, 10 para G e 100 para B. Como o valor dominante está no componente R, então a cor resultante será avermelhada com pouca influência do verde e uma influência um pouco maior do azul.

Uma característica muito importante deste processo é que, para gerar um tom neutro, conhecido como gris, basta colocar o mesmo valor para os três componentes, por exemplo, um valor de 120 em R, G e B vai gerar um tom neutro, e quando se utilizarem valores extremos como 255, o resultado é branco puro e, quando o valor for 0 (zero), preto puro.

2.2.2 Tons de cinza

A imagem em tons de cinza pode ser obtida de acordo com a Equação (6), RUBERT et al. (2004), a qual mostra que um pixel da imagem em tons de cinza é formado por uma relação entre os valores dos pixels correspondentes nas camadas R, G e B e na **Erro! Fonte de referência não encontrada.** 20a é apresentada uma imagem em RGB e na Figura 20b é apresentada a mesma imagem convertida em tons de cinza.

$$Y = 0,299R + 0,587G + 0,114B \quad (6)$$

Figura 20 - Imagem em RGB e conversão para o componente Y (tons de cinza).



(a)

Fonte: Elaborado pelo autor



(b)

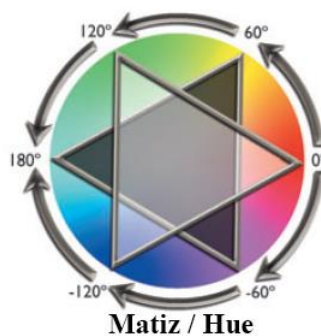
Este modelo de cor é amplamente utilizado em processamento de imagens por ser formado por apenas uma camada (diferente do RGB que tem 3 camadas) sem perder as características visuais da imagem e reduzindo o tempo de processamento. Entretanto, perde-se a possibilidade de trabalhar com uma vasta gama de cores, limitando o processamento a apenas alguns níveis de cinza.

2.2.3 HSB

O modelo HSB descreve as cores a partir de 3 propriedades fundamentais, que são o Tom (também chamado de matiz) ou *Hue*, a Saturação ou *Saturation*, e o Brilho ou *Brightness*.

Um aspecto muito marcante no espectro de cores, está na distância entre as cores, que segue uma simetria e, por sua vez, pode ser determinada em ângulos. Nada mais é do que o posicionamento da cor no espectro, ou seja, o vermelho tem seu valor sempre em 0° e a partir dele pode-se medir o posicionamento das outras cores que estão exatamente a 60° de distância em sentido horário e anti-horário, como está representado na **Erro! Fonte de referência não encontrada**.²¹.

Figura 21 - Mapeamento do tom / Hue.



Fonte: Keese (2012)

As cores também podem variar quanto a saturação, que é a intensidade ou a pureza das cores. Se o espectro de cores é mapeado visto de cima, se diz então que a saturação da cor é o valor encontrado para a posição desta cor mais próxima à extremidade ou mais próxima ao centro do espectro de cores, onde existe uma neutralização, como é representado na **Erro! Fonte de referência não encontrada.2**.

Figura 22 - Espectro de saturação.



Fonte: Adaptado de Keese (2012)

Uma vez que o espectro de cores é tridimensional como na ilustração da **Erro! Fonte de referência não encontrada.3** e não bidimensional conforme visto até agora, tem-se uma coordenada de luz que varia entre duas extremidades que vão de 0% (preto) a 100% (branco). Essa coordenada é responsável pela quantidade de luz ou pela definição de uma cor clara (com luminosidade) ou escura (sem luminosidade). Embora não exista um modo de imagens em HSB, muitos comandos convertem um outro modelo para este, a fim de que o usuário possa processar imagens com maior precisão e reconhecimento das cores.

Figura 23 - Espectro de cores tridimensional.



Fonte: Adaptado de Keese (2012)

Neste capítulo foram discutidos os conceitos básicos de formação e estrutura de imagens e câmeras digitais, os quais são usados para o desenvolvimento da metodologia proposta.

3 MÉTODO DE MEDIDA DE DESLOCAMENTO UTILIZANDO A VARIAÇÃO EM PIXELS DA POSIÇÃO DO OBJETO NA IMAGEM

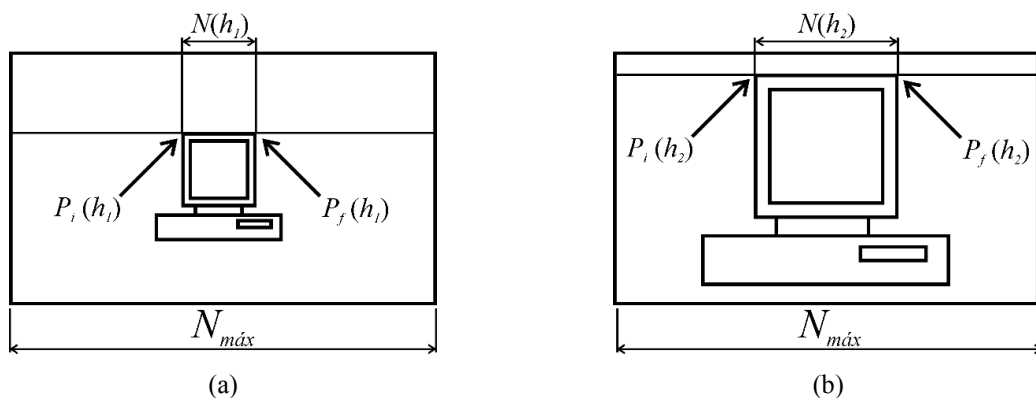
Este capítulo apresenta o método de medição de deslocamento e vibrações proposto e discute a obtenção dos parâmetros da câmera e do processo de medição, bem como, as relações pixels objeto. Neste caso, a medida de deslocamento do objeto será realizada através da variação da posição dos pixels centrais do alvo de uma imagem para outra.

3.1 Variação do tamanho do alvo na imagem

Quando um objeto é focado por uma câmera, ele assume na imagem um determinado valor em pixels referente as suas dimensões. Estes valores mudam conforme um deslocamento é aplicado à câmera, aproximando-a ou afastando-a do objeto. Na Figura 24a e 24b são ilustradas as imagens obtidas para diferentes distâncias entre a câmera e o alvo, sendo na Figura 24a a imagem que possui o objeto mais afastado da câmera e na Figura 24b é apresentada a imagem que possui o objeto mais próximo à câmera, que confirmam que para as diferentes posições da câmera são assumidos diferentes tamanhos para o objeto na imagem, embora no mundo real este objeto não tenha mudado de tamanho.

Quando são analisadas as duas imagens geradas pelas duas diferentes posições da câmera, pode-se visualizar que o número de pixels encontrado para a representação do objeto na Figura 24a é diferente do número de pixels encontrado para a mesma representação na Figura 24b, representado por $N(h_1)$ e $N(h_2)$ respectivamente. Existe então, uma variação do número de pixels para determinado objeto em uma imagem devido ao deslocamento aplicado à câmera.

Figura 24 - Variação do número de pixels para distâncias diferentes entre a câmera e o objeto.



Fonte: Elaborado pelo autor

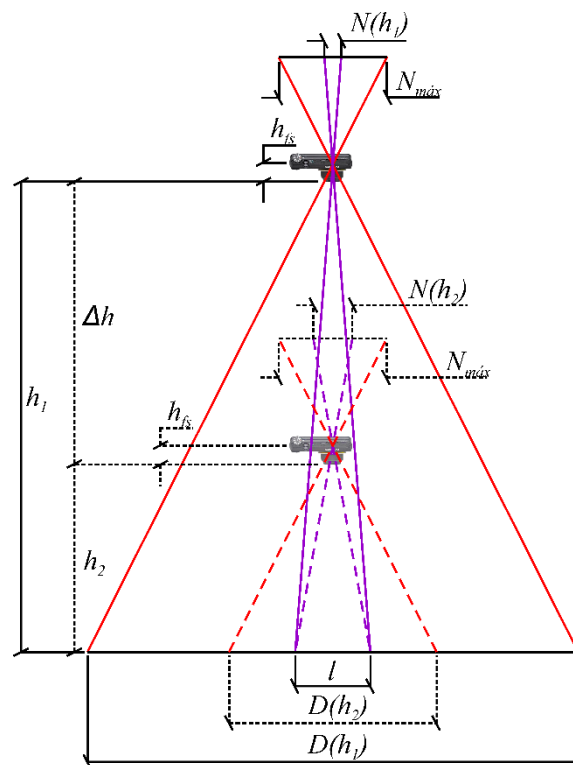
Nesta figura, $P_i(h_1)$ representa o ponto inicial do objeto na imagem capturada na distância h_1 , $P_f(h_2)$ representa o ponto inicial do objeto na imagem capturada na distância h_2 , $P_f(h_1)$ representa o ponto final do objeto na imagem capturada na distância h_1 e $P_i(h_2)$ representa o ponto final do objeto na imagem capturada na distância h_2 .

Utilizando esta característica é possível estimar a distância entre a câmera na posição h_1 e/ou h_2 e o objeto.

3.2 Obtenção da distância da câmera ao objeto

Um esquema é apresentado na **Erro! Fonte de referência não encontrada.5** que mostra o princípio de funcionamento do método. Observa-se primeiramente que existem duas posições para a câmera, isto se deve ao fato de que a câmera fará uma captura de imagem em uma posição e outra captura de imagem em outra posição afastada da primeira de Δh . A relação entre pixels e unidade de comprimento será obtida através de leis trigonométricas.

Figura 25 - Esquema do método proposto.



Fonte: Adaptado de Hsu et al. (2009)

Assumindo que o objeto a ser medido esteja posicionado perpendicularmente ao eixo óptico da câmera, existe uma relação muito próxima entre distância e número de pixels.

O esquema da **Erro! Fonte de referência não encontrada.**5 mostra que as imagens são capturadas nas distâncias h_1 e h_2 a partir da face da câmera mais a distância h_{fs} , $D(h_1)$ e $D(h_2)$ são as medidas máximas do mundo real visualizadas pelo campo de visão da câmera em cada posição h_1 e h_2 , l é o tamanho do objeto a ser medido e $N(h_1)$ e $N(h_2)$ são os números de pixels do objeto l para cada posição e N_{max} é o número máximo dos pixels da imagem na horizontal ou vertical, que a priori é conhecido.

Assumindo que o comprimento do objeto l não mudará pode-se fazer as seguintes relações

$$\frac{l}{N(h_1)} = \frac{D(h_1)}{N_{max}} \quad (7)$$

$$\frac{l}{N(h_2)} = \frac{D(h_2)}{N_{max}} \quad (8)$$

Isolando os termos que são fixos, das Equações (7) e (8)

$$l * N_{max} = D(h_1)N(h_1) \quad (9)$$

$$l * N_{max} = D(h_2)N(h_2) \quad (10)$$

Igualando as Equações (9) e (10) obtém-se a Equação (71)

$$\frac{D(h_1)}{D(h_2)} = \frac{N(h_2)}{N(h_1)} \quad (71)$$

Tomando as propriedades de semelhanças de triângulos pode-se adotar que a relação entre as bases dos triângulos são proporcionais à relação entre as alturas dos triângulos, sendo assim, obtém-se a Equação (82)

$$\frac{D(h_1)}{D(h_2)} = \frac{h_1 + h_{fs}}{h_2 + h_{fs}} \quad (82)$$

Desta forma, aplicando a relação entre distância do objeto e a câmera com o número de pixels da imagem, segue a Equação (93)

$$\frac{N(h_2)}{N(h_1)} = \frac{h_1 + h_{fs}}{h_2 + h_{fs}} \quad (93)$$

Sabendo que $\Delta h = h_1 - h_2$, substitui-se a variável a qual se deseja conhecer na Equação (13), por exemplo, $h_1 = \Delta h + h_2$, assim, a Equação (104) resulta em

$$\frac{N(h_2)}{N(h_1)} = \frac{\Delta h + h_2 + h_{fs}}{h_2 + h_{fs}} \quad (104)$$

Realizando as multiplicações dos dois termos da Equação (104) se obtém a Equação (15)

$$N(h_2)h_2 + N(h_2)h_s = N(h_1)\Delta h + N(h_1)h_2 + N(h_1)h_s \quad (15)$$

Que sendo remanejada e isolando as variáveis h_2 e h_s obtém-se

$$h_2(N(h_2) - N(h_1)) + h_{fs}(N(h_2) - N(h_1)) = N(h_1)\Delta h \quad (16)$$

$$(h_2 + h_{fs})(N(h_2) - N(h_1)) = N(h_1)\Delta h \quad (17)$$

E finalmente, isolando somente a distância h_2

$$h_2 = \frac{N(h_1)\Delta h}{N(h_2) - N(h_1)} - h_{fs} \quad (18)$$

Da mesma forma, partindo da Equação (93) e substituindo h_2 por $h_1 - \Delta h$ obtém-se

$$h_1 = \frac{N(h_2)\Delta h}{N(h_2) - N(h_1)} - h_{fs} \quad (19)$$

Desta forma, é possível estimar a distância da câmera ao objeto através da variação do número de pixels do objeto na imagem e com o movimento da câmera.

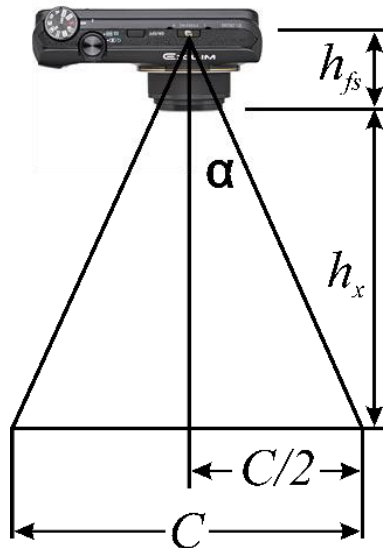
3.3 Relação entre unidade de comprimento e pixel

Com os valores de h_1 e h_2 já estimados é possível estimar o valor da distância do fundo da imagem com a Equação (2011), proveniente da relação ilustrada na **Erro! Fonte de referência não encontrada.26**.

$$C_{x,y} = 2 \tan(\alpha)(h_x + h_{fs}) \quad (2011)$$

Nesta equação, $C_{x,y}$ é o comprimento do fundo da imagem na coordenada X ou Y, α é metade do ângulo de visão da câmera e h_x é a distância da câmera ao objeto h_1 ou h_2 .

Figura 26 - Câmera com o triângulo com altura estimada e comprimento de fundo da imagem estimada.



Fonte: Elaborado pelo autor

Com o valor do tamanho do fundo da imagem já conhecido, basta dividir este valor pelo número de linhas ou colunas usadas na resolução da imagem processada. Caso o usuário queira saber a relação entre unidade de comprimento e número de pixels na horizontal ele deverá saber também qual é a resolução de imagem que foi processada. Supondo que tenha sido a resolução de 480x640, isto quer dizer que a relação será o valor do tamanho do fundo da imagem estimado dividido por 640, pois 640 representa o número de colunas da imagem, caso o usuário queira saber a relação para a direção vertical, o tamanho do fundo na vertical deverá ser conhecida e dividida por 480, que representa o número de linhas da imagem. A Equação 21 mostra a relação entre unidade de comprimento e número de pixels.

$$R = \frac{C_{x,y}}{N_{max_{x,y}}} \quad (121)$$

$C_{x,y}$ é encontrado com a Equação (2011) e $N_{max_{x,y}}$ é o número máximo de pixels da direção utilizada na filmagem.

Para estimar o valor do tamanho do objeto em unidade de comprimento basta multiplicar o número de pixels do tamanho do objeto ($N(h_1)$ ou $N(h_2)$) pelo valor encontrado da relação na Equação (121).

No entanto, o objetivo deste trabalho é medir o deslocamento de um objeto alvo e não sua distância à câmera ou seu comprimento, como foi discutido em Hsu (2009).

Para a obtenção do movimento de um alvo é necessário identifica-lo na cena e localizar seu centro, o qual será dado como referência da posição do alvo em toda a cena em uma única imagem. Este processo é repetido para uma sequência de imagens (filme), em que a cada imagem o alvo é localizado em uma nova posição e seu novo centro é extraído, resultando na formação do movimento do objeto alvo.

3.4 Identificação da posição do alvo na imagem

Uma vez montado o aparato, inicia-se a aquisição do vídeo que vai capturar os movimentos do alvo de interesse. As imagens do vídeo que fornecem a sequência do movimento do alvo quadro a quadro. O processamento das imagens neste caso busca evidenciar o alvo na imagem separando-o do restante da cena de forma que possa ser obtida a posição do mesmo em termos do número de pixels bem como a sua posição na imagem.

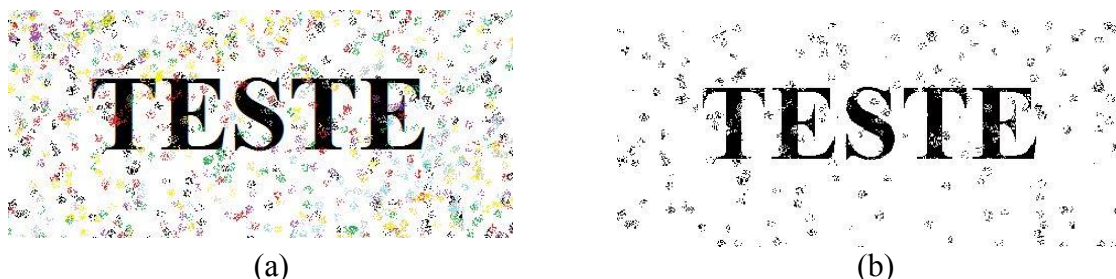
3.4.1 Separação do Alvo da Cena

A forma discutida neste trabalho, de separar os alvos do restante da cena, é com o uso de ferramentas computacionais de processamento de imagens de segmentação e morfológica que são empregadas em cada quadro do vídeo, evidenciando e deixando somente o objeto de interesse a mostra na imagem, como retas, curvas, bordas e outras características.

A forma mais eficiente de se separar um alvo do restante da cena é remover intensidades de cores que não são de interesse. Esta ferramenta é denominada de limiar de corte e é comumente chamada de *thresholding* (GONZALES; WOODS 2002). Na Figura 27 é

apresentada uma imagem original colorida e a mesma imagem com a aplicação do limiar de corte em um dado valor.

Figura 27 - (a) Imagem original (RGB) e (b) imagem após uso do limiar de corte (*Thresholding*)



Fonte: Elaborado pelo autor.

Observa-se que o limiar de corte pode deixar resíduos ou retirar partes do objeto que são desejáveis, logo, devem ser empregadas outras ferramentas de processamento de imagens para retirar os resíduos ou para preencher as partes perdidas, que são chamadas de ferramentas de operações morfológicas.

Estas ferramentas são um conjunto de operações de processamento de imagens baseadas em formas. A ideia básica em morfologia binária é comparar conjuntos de pixels na imagem com um elemento estruturante (forma pré-definida) verificando como esta forma se ajusta ou falta nas formas da imagem (GONZALES; WOODS, 2002). O elemento estruturante é aplicado na imagem de entrada criando uma nova imagem de saída de mesmas dimensões, mas diferente da imagem de entrada.

Numa operação morfológica, o valor de cada pixel na imagem de saída é baseada numa comparação entre o pixel correspondente na imagem de entrada com os seus vizinhos. Ao escolher a forma e tamanho da vizinhança, é possível construir uma operação morfológica que é sensível às formas específicas na imagem de entrada.

A dilatação e a erosão são as operações morfológicas mais simples. A dilatação adiciona pixels nas bordas do objeto na imagem, enquanto que a erosão remove pixels das bordas do objeto na imagem. Na Figura 28a é apresentada a aplicação da erosão na Figura 27b, e na Figura 28b é apresentada a aplicação da dilatação na Figura 28a seguida da inversão de pixels (0 torna-se 1 e vice-versa).

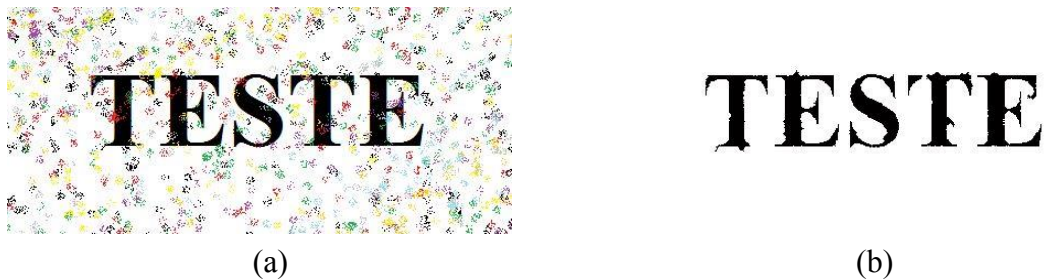
Figura 28 – (a) Erosão e (b) dilatação



Fonte: Elaborado pelo autor

Várias outras operações morfológicas podem ser empregadas em processamento de imagens, no caso da Figura 29 foram empregadas algumas ferramentas que não serão abordadas neste trabalho, mas que mostra que é possível extrair informações significantes a partir da segmentação e aplicação de elementos estruturantes nas imagens.

Figura 29 – (a) Imagem original e (b) imagem processada com várias ferramentas.



Fonte: Elaborado pelo autor

Com a separação do(s) alvo(s) do restante da cena, inicia-se o processo de localização do centro do(s) objeto(s) alvo(s).

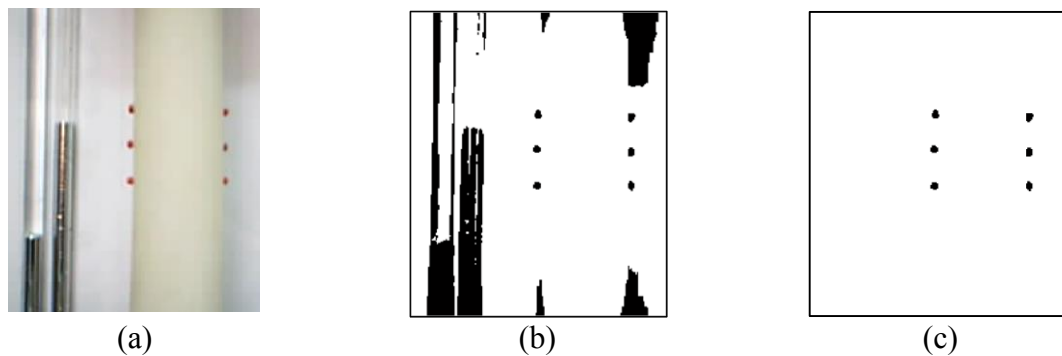
3.5 Identificação do centro do alvo através da caixa de contorno

Na identificação e seleção do alvo, o vídeo é processado e as imagens são separadas quadro a quadro formando uma sequência das imagens. Com a sequência de imagens extraídas do vídeo, o algoritmo desenvolvido e implementado em *Matlab®*, faz o processamento das imagens utilizando o conjunto de ferramentas discutido na seção anterior.

Para a identificação do centro dos alvos na cena é feita uma varredura da imagem buscando os seus limites (alvo) e posteriormente é calculado seu centroide e sua posição na cena, na Figura 30 é ilustrado o processo de obtenção dos alvos como discutido da seção anterior, desta forma os alvos ficam evidenciados e inicia-se o processo de varredura na imagem, de forma a encontrar as bordas dos alvos, na **Erro! Fonte de referência não**

encontrada. é apresentada a imagem original, na Figura 30b a imagem original processada, no entanto, com alguns elementos ainda indesejáveis, e na Figura 30c pode-se ver somente os objetos de interesse.

Figura 30 – (a) Imagem captada pela câmera, (b) após uso de limiar de corte e (c) após retirada de alvos indesejados

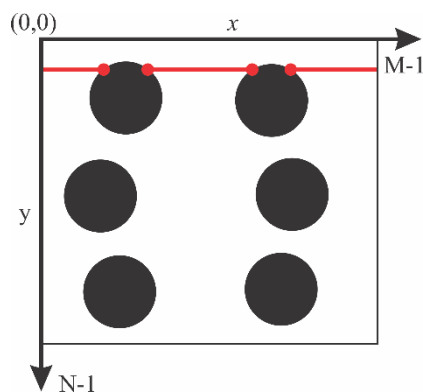


Fonte: Elaborado pelo autor.

Para identificar a posição de cada objeto, uma caixa de contorno 2D é aplicada de forma a centralizar o objeto em seu centro.

A partir da varredura de cada pixel da imagem, sendo esta realizada da esquerda para a direita e de cima para baixo, quando um pixel assumindo o valor de 1 (imagem binária) é encontrado, então esta posição (X,Y) é marcada como sendo o início do objeto, e quando o próximo pixel encontrado na mesma linha se torna 0, quer dizer que uma posição anterior é o final do objeto, logo, esta posição anterior é marcada, Figura 31. Caso o início de outra borda seja encontrada na mesma linha que está passando pela varredura dos pixels antes do término da linha, esta posição é marcada como o início de um novo objeto.

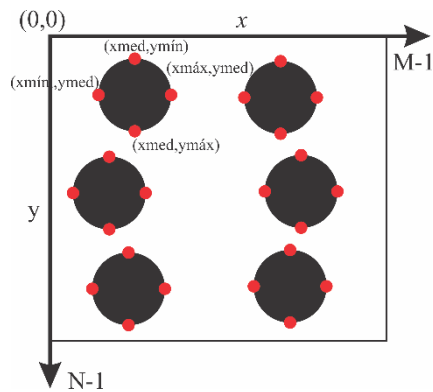
Figura 31 - Achando o alvo através das bordas



Fonte: Elaborado pelo autor.

Após a definição das bordas dos objetos, pode-se compreender seus formatos. De modo a criar uma caixa de contorno para encontrar o centro geométrico dos objetos, 4 vértices devem ser encontrados, eles são os maiores e menores valores das coordenadas X e Y para cada um dos alvos (Figura 32).

Figura 32 - Valores máximos e mínimos para o objeto.

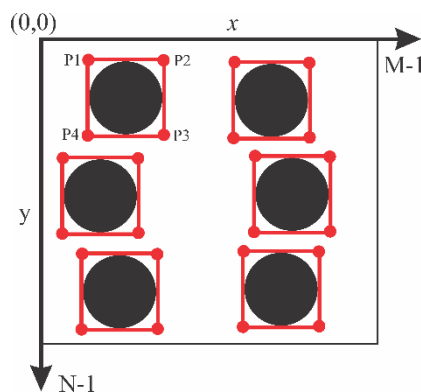


Fonte: Elaborado pelo autor.

Com os valores máximos e mínimos das posições dos objetos, os pontos da caixa de contorno são definidos da seguinte forma:

$P1(X_{min}, Y_{min})_i$, $P2(X_{max}, Y_{min})_i$, $P3(X_{max}, Y_{max})_i$ e $P4(X_{min}, Y_{max})_i$, onde P é um ponto de definição da caixa, X e Y são as coordenadas do ponto P e i é o nome da caixa de contorno, conforme **Erro! Fonte de referência não encontrada.3**.

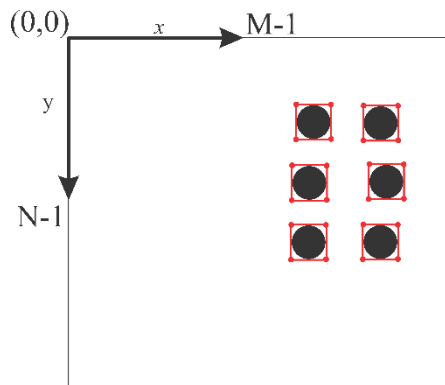
Figura 33 - Caixa de contorno 2D.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Desta forma, a Figura 30a pode ser representada com as caixas de contorno na Figura 34.

Figura 34 - Imagem processada.



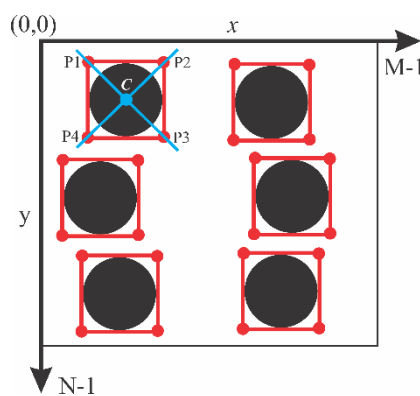
Fonte: Elaborado pelo autor.

Com as posições dos alvos já extraídas da cena, prossegue-se para o cálculo da posição do centro dos alvos.

3.5.1 Cálculo do centro do alvo

O cálculo do centro do alvo utilizando caixas de contorno pode ser feito através da obtenção do ponto de cruzamento formado pelas retas dos Pontos 1 e 3 com os Pontos 2 e 4, que é representado esquematicamente na Figura 35.

Figura 35 - Centro do Alvo definido pelo cruzamento das retas.

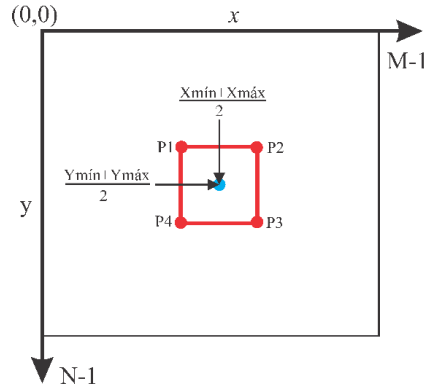


Fonte: Elaborado pelo autor.

Uma forma de calcular o centro do alvo do objeto é através da Equação 22, onde facilmente pode-se visualizar que o centro do alvo, com relação a origem da imagem, é o valor das posições mínimas nas coordenadas X e Y mais a metade do comprimento em cada eixo. Na Figura 36 é apresentado o passo final para obtenção do centro do objeto.

$$C = \left(X_1 + \left(\frac{X_2 - X_1}{2} \right), Y_1 + \left(\frac{Y_2 - Y_1}{2} \right) \right) \quad (22)$$

Figura 36 - Centro do alvo definido pela média dos valores de X e Y da caixa de contorno.



Fonte: Elaborado pelo autor.

A forma mais simplificada para a Equação 22 é apresentada na Equação 23.

$$C = \left(\frac{X_{max} + X_{min}}{2}, \frac{Y_{max} + Y_{min}}{2} \right) \quad (23)$$

O deslocamento do alvo é obtido a partir da sequência de imagens extraídas do vídeo, sendo que as posições de seu centroide na cena para cada imagem representam seu movimento no passar do tempo, assim a diferença entre a posição do centroide em uma imagem inicial e uma outra posição obtida em outra imagem representa o caminho percorrido pelo alvo. Quando o alvo está se movendo, a diferença da posição dos centroides (em pixels) entre as duas posições permite calcular o deslocamento do alvo. Ao término do processamento da sequência de imagens tem-se as posições do centroide do alvo para cada instante em que a imagem foi capturada, formando assim, o corresponde deslocamento do alvo ao longo do tempo de filmagem. No caso em que exista mais do que um alvo na cena, se torna necessário a aplicação de um algoritmo de rastreamento, a fim de ordenar o deslocamento de cada alvo separadamente.

3.6 Rastreamento de objetos

O rastreamento em sequências de imagens é uma tarefa que consiste em monitorar a posição de um alvo ou conjunto de alvos de interesse, no caso deste trabalho, determinando sua trajetória bidimensional, no plano da imagem, utilizando informações advindas de câmeras (SÄRKKÄ, 2004).

A atual literatura aborda diferentes técnicas para resolver o problema do rastreamento de alvos, sendo eles a simples detecção visual das características nos pixels de cada quadro na sequência de imagens, técnicas pervasivas com a utilização de marcadores de localização instalados nos alvos ou a abordagem probabilística baseada em conjuntos de informações analisadas em cada quadro da sequência de imagens.

A técnica de rastreamento de objetos implementado neste trabalho foi desenvolvida baseada na técnica de rastreamento de jogadores de futebol (MISUTA, 2004), a técnica desenvolvida mescla as propriedades das técnicas de detecção visual das características dos pixels e de utilização de marcadores fixados nos alvos.

Para o armazenamento dos deslocamentos sofridos pelos alvos nas imagens, uma variável do tipo tabela é criada, onde o número de linhas representa o número de alvos de interesse e o número de colunas representa a quantidade de aquisições realizadas pela câmera.

Supondo que dois alvos estão sendo medidos e estão em constante movimento, o programador escolhe um valor ligeiramente maior que o valor que representa o quanto os alvos se movimentam de um quadro para o outro. Em um dado instante t_0 , após os objetos alvos terem sido separados do restante da cena e os valores de seus centroides em função de pixels terem sido encontrados, estes valores são armazenados na variável do tipo tabela, onde o primeiro centroide encontrado é armazenado na posição (1,1) e o segundo centroide armazenado na posição (2,1). Em outro instante t_1 , outra imagem é processada e sofre o mesmo processo descrito anteriormente, obtendo então novas posições dos centroides dos alvos. O primeiro centroide encontrado é armazenado na variável tipo tabela na posição (1,2) e o segundo centroide encontrado é armazenado na posição (2,2). Note que não necessariamente os alvos sempre obedecerão a ordem de serem encontrados, fazendo com que a sequência dos centroides armazenada possa estar errada, ou seja, o centroide do alvo 1 pode ser confundido com o centroide do alvo 2. Na Tabela 4 é representado a obtenção e armazenamento de dois centroides em quatro imagens diferentes, os centroides são obtidos em função das coordenadas X e Y em pixels, note que na imagem 3, houve uma inversão na identificação dos alvos.

Tabela 4 – Valores das posições dos centroides dos alvos.

	Centroides da sequência de imagens em X e Y			
	Imagem 1	Imagem 2	Imagem 3	Imagem 4
Alvo 1	[100,300]	[110,310]	[530,200]	[120,310]
Alvo 2	[500,200]	[520,190]	[120,300]	[520,180]

Fonte: Elaborado pelo autor.

Para garantir que os valores dos centroides sejam armazenados nas posições corretas, um sistema de comparação de distâncias é realizado a fim de rastrear um alvo do instante anterior para o instante atual. Cada um dos centroides dos alvos da imagem anterior é comparado a cada um dos valores dos centroides dos alvos atuais objetivando obter a distância percorrida por cada um.

O primeiro alvo encontrado na primeira imagem é comparado com o primeiro alvo encontrado na segunda imagem através da Equação 24.

$$distância = \sqrt{(x_{t_1} - x_{t_0})^2 + (y_{t_1} - y_{t_0})^2} \quad (24)$$

Nesta equação, distância é o valor da máxima distância percorrida pelo alvo, x_{t_1} é o valor do centroide na posição x da imagem no instante t_1 (atual), x_{t_0} é o valor do centroide na posição x da imagem no instante t_0 (anterior), y_{t_1} é o valor do centroide na posição y da imagem no instante t_1 (atual) e y_{t_0} é o valor do centroide na posição y da imagem no instante t_0 (anterior).

Se o valor de distância for menor que o valor estipulado pelo programador, isto quer dizer que os centroides comparados representam o mesmo alvo, caso contrário, os centroides comparados representam alvos diferentes ou o alvo correto extrapolou o limite de distância máxima imposto pelo programador.

Da mesma forma que foi realizada a comparação entre o primeiro alvo da primeira imagem e o primeiro alvo da segunda imagem, agora é comparado o primeiro alvo da primeira imagem com o segundo alvo da segunda imagem, e depois o segundo alvo da primeira imagem é comparado com todos os alvos encontrados na segunda imagem, ou seja, todos alvos de uma imagem são comparados separadamente com todos os alvos encontrados na imagem posterior.

Com os valores das distâncias já estabelecidos para a ligação entre cada um dos alvos, é criada uma nova variável do tipo tabela, que é composta por 3 colunas que armazenam na primeira coluna os valores das posições X dos centroides dos alvos, na segunda coluna os valores das posições Y dos centroides dos alvos e na terceira coluna um rótulo que nomeia cada alvo numericamente, de acordo com a distância obtida na Equação 24. Na Tabela 5 é apresentada tal variável e note que os alvos foram encontrados em sequência invertida na Imagem 3.

Tabela 5 - Rótulo dos alvos.

		X	Y	Rótulo
Imagem 1	Alvo 1	100	300	1
	Alvo 2	500	200	2
Imagem 2	Alvo 1	110	310	1
	Alvo 2	520	190	2
Imagem 3	Alvo 1	530	200	2
	Alvo 2	120	300	1
Imagem 4	Alvo 1	120	310	1
	Alvo 2	520	180	2

Fonte: Elaborado pelo autor.

Desta forma, com os valores dos rótulos nomeando cada um dos valores dos centroides, os alvos são ordenados de forma a criar para cada alvo um vetor de deslocamento nas posições X e Y no decorrer do tempo. Reajustando a Tabela 5 obtém-se o deslocamento de cada alvo para as coordenadas X e Y e o resultado é apresentado na Tabela 6:

Tabela 6 - Ordenando o movimento dos alvos.

	Alvo 1			
Deslocamento em X	100	110	120	120
Deslocamento em Y	300	310	300	310
	Alvo 2			
Deslocamento em X	500	520	530	520
Deslocamento em Y	200	190	200	180

Fonte: Elaborado pelo autor.

Este capítulo encerra a discussão teórica sobre a formação, obtenção e processamento das imagens digitais, a fim de obter o deslocamento de um alvo ou conjunto de alvos em uma sequência de imagens.

O próximo capítulo discute sucintamente o funcionamento do *software* desenvolvido e os capítulos seguintes abordam os experimentos realizados utilizando a metodologia proposta a fim de avaliar a mesma através de comparações com instrumentos de medição de precisão conhecidos.

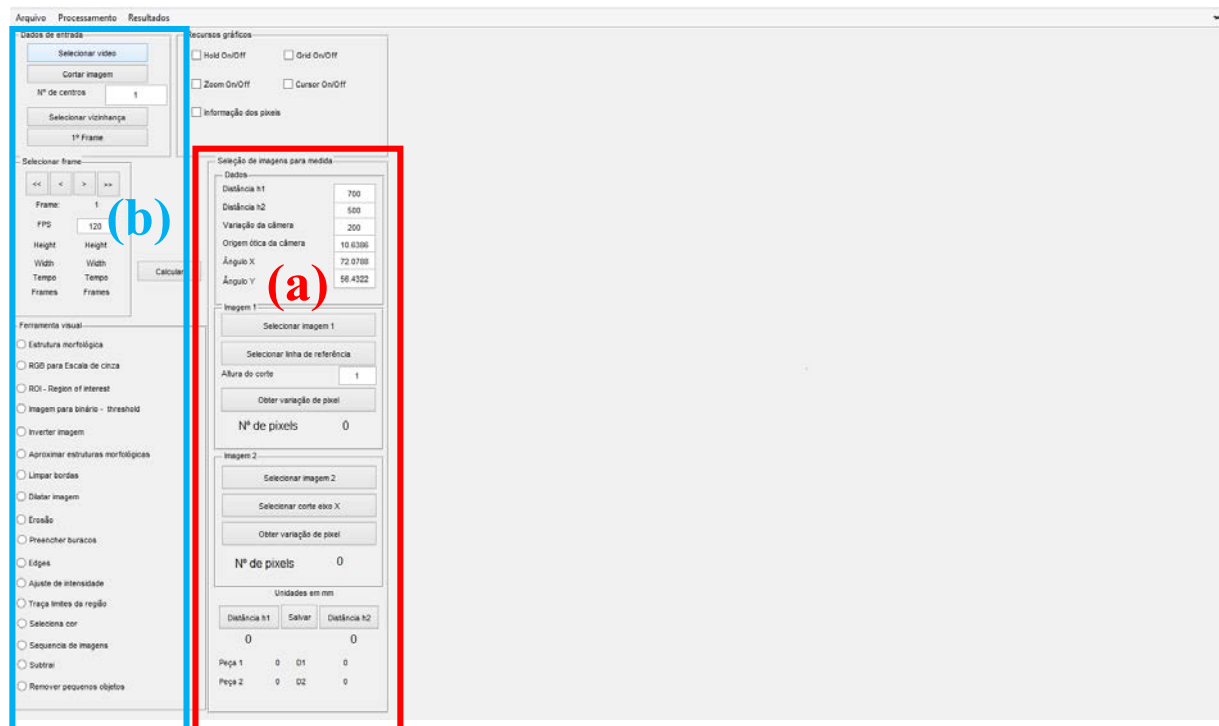
4 APRESENTAÇÃO DO SOFTWARE IMPLEMENTADO

O *software* foi implementado no ambiente *Matlab*® em módulos independentes utilizando a sistemática de interface gráfica para cada módulo que proporciona uma interação com o usuário.

A implementação e desenvolvimento do *software* envolveu a análise e utilização de grande número de ferramentas matemáticas e funções do próprio *Matlab*®, as quais não serão discutidas em detalhes.

A tela inicial do *software* é apresentada na Figura 37, a qual evidencia por meio de dois quadros coloridos os blocos responsáveis (a) pela obtenção da relação unidade/pixel e (b) pelo processamento das imagens do vídeo.

Figura 37 - Tela geral do *software*



Fonte: Elaborado pelo autor.

A função de cada item citado acima será discutida nos tópicos seguintes, abrangendo melhor suas finalidades no *software*.

4.1 Obter curvas de distorções da lente

As lentes, como dito na seção 2.1.1.1, possuem imperfeições devido a sua fabricação que causam deformações nas imagens, e estas deformações podem comprometer a medida conforme o alvo se localiza mais próximo à borda da imagem.

Para a correção destas imagens é utilizada uma *toolbox* para *Matlab*®, desenvolvida por Jean-Yves Bouguet do Departamento de Engenharia Elétrica do Instituto de Tecnologia da Califórnia, com a última atualização realizada em 9 de julho de 2010, e que é disponibilizado gratuitamente em seu site pessoal (BOUGUET, 2013). A *toolbox* contém três diferentes métodos implementados para identificação dos parâmetros das lentes e neste trabalho foi utilizado o método de Zhengyou Zhang (ZHANG, 1999).

Neste método, o processo de identificação consiste em tirar várias fotos com um objeto padrão em várias posições no espaço, como por exemplo um tabuleiro de xadrez, onde se conhece as medidas de todos os quadrados do tabuleiro e posteriormente selecionar quatro vértices dos quadrados dos tabuleiros formando um retângulo para verificar a distorção da imagem.

Neste caso, para avaliação da distorção da lente da camera, foi utilizado um tabuleiro com as medidas conhecidas. Na Figura 38 são apresentadas as fotos tiradas para o levantamento das distorções da câmera, essas imagens devem, de alguma forma, permitir ao usuário avaliar as distorções da lente em relação à posição do objeto alvo (tabuleiro) na imagem. Numa primeira foto a imagem contém praticamente todo o objeto alvo (tabuleiro), Figura 38a. Nas demais, as imagens mostram o objeto em diferentes posições, por exemplo, na Figura 38b o objeto aparece no canto inferior esquerdo da cena. Na Figura 38c o objeto aparece no canto superior esquerdo e na Figura 38d o objeto aparece inclinado na cena no canto inferior direito a fim de que o efeito da distorção da lente possa ser avaliado para o objeto em qualquer posição na imagem em relação à cena.

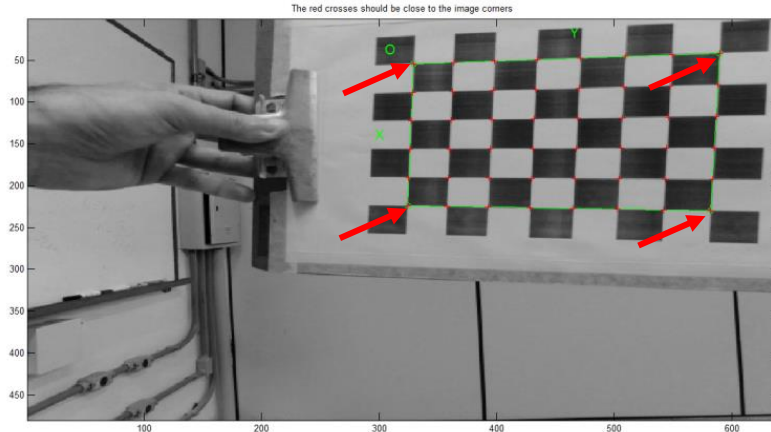
Figura 38 - Fotos capturadas para análise da distorção da lente da câmera.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Uma vez armazenada todas as fotos, o usuário seleciona quatro pontos na imagem, a fim de formar um retângulo, clicando em seus vértices, conforme é ilustrado na Figura 39. Esta definição do retângulo é utilizada para determinar as distorções do objeto.

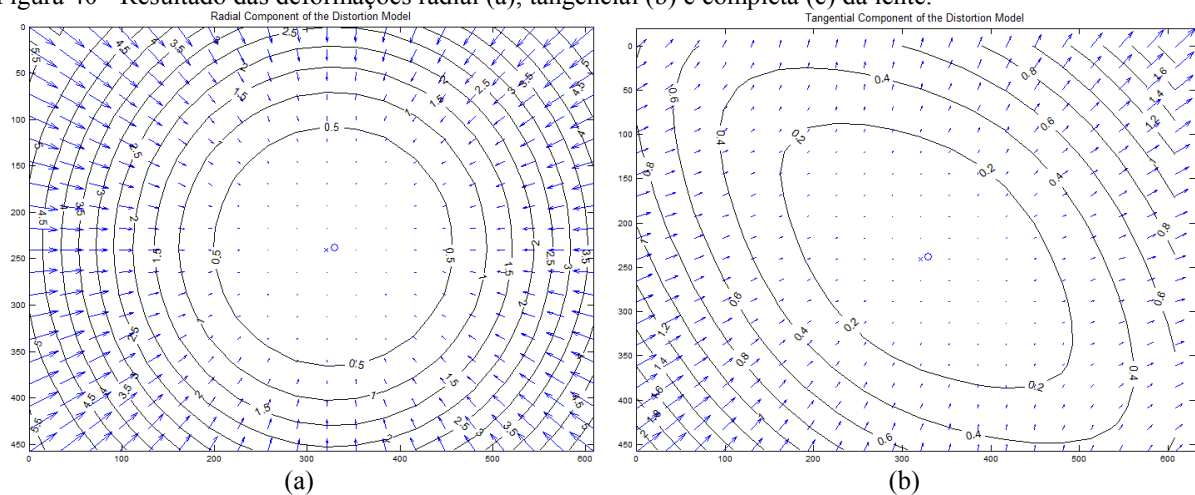
Figura 39 - Processo de extração dos parâmetros da lente.

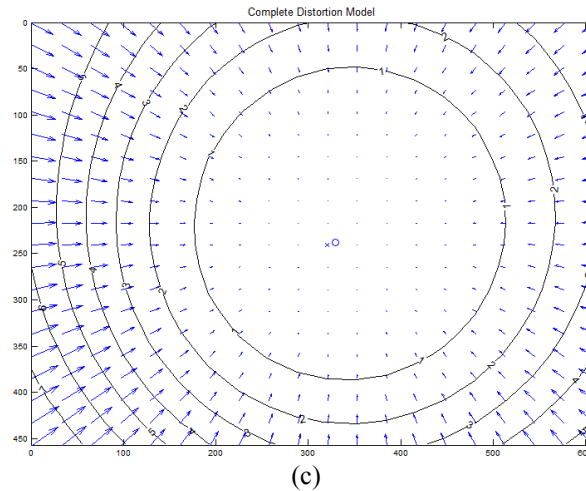


Fonte: Elaborado pelo autor.

Após este processo ser feito na primeira imagem, todas as outras são verificadas automaticamente e assim é estimado os valores das distorções radial, tangencial e completa, conforme discutido na seção 2.1.1.1. Na Figura 40 são ilustrados os resultados das distorções da lente, a deformação radial (Figura 40a), deformação tangencial (Figura 40b) e distorção total (Figura 40c), a qual é a soma das distorções radial e tangencial.

Figura 40 - Resultado das deformações radial (a), tangencial (b) e completa (c) da lente.





Fonte: Elaborado pelo autor.

Através dos resultados pode-se dizer que as maiores distorções nesta lente encontram-se em suas bordas, tanto na distorção radial quanto na tangencial, o que ocasiona a mesma situação para a distorção completa, que é a combinação entre as distorções radial e tangencial. Já o centro da lente praticamente não possui distorções, o que leva a considerar que, quando for realizada uma medida em que o alvo permanece na região central da lente, não é necessário corrigir as imagens, visto que praticamente não existirá deformações no deslocamento do alvo na imagem.

A conversão da distorção de uma imagem é feita multiplicando a matriz de distorção total pela imagem que se deseja corrigir. Isso leva a uma nova imagem sem distorções devido as lentes.

4.2 Medida de deslocamento

Para se obter o deslocamento de um alvo ou conjunto de alvos, após a obtenção dos parâmetros de calibração da lente o sistema está preparado para processar as imagens e obter os deslocamentos dos alvos.

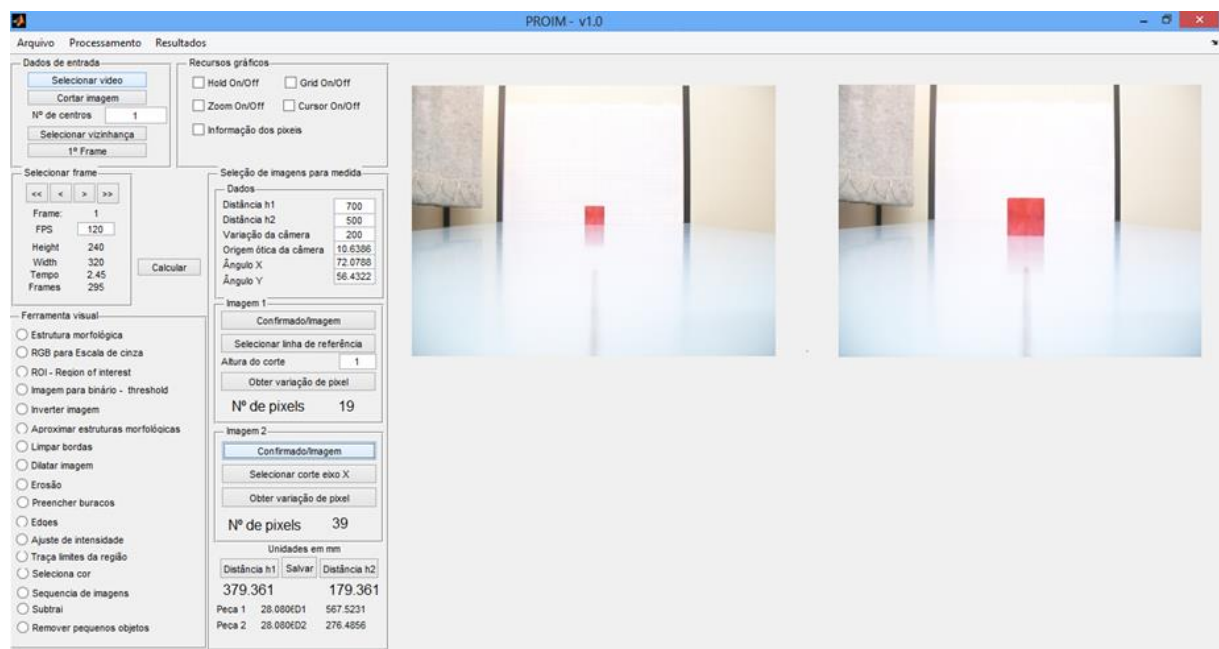
Para obtenção dos deslocamentos dos alvos é necessário, primeiramente, que seja obtida a relação entre unidade de comprimento utilizado na medida e pixel, para que este valor seja utilizado na conversão do deslocamento em pixels dos alvos para a unidade de medida correspondente. A obtenção do valor da relação unidade de medida por pixel e os deslocamentos dos alvos são obtidos empregando ferramentas de processamento de imagens nestas duas etapas.

4.2.1 Obtenção da relação unidade de comprimento por pixel

Para obtenção da relação unidade de comprimento por pixel é analisado o movimento (afastamento/aproximação) de um objeto em relação a camera.

Neste caso, a obtenção da relação unidade/pixel, Figura 41, é dividida em quatro etapas, sendo a primeira a entrada de dados, onde o usuário deve colocar o deslocamento aplicado à câmera, a distância h_{fs} e os ângulos de visão dos eixos X e Y, a segunda etapa consiste no processamento da primeira imagem e obtenção do número de pixels do objeto, a terceira etapa é uma repetição da etapa 2, mas agora utilizando a segunda imagem obtida com o afastamento/aproximação da camera e por último, é realizada a quarta etapa que consiste nos cálculos que levam a estimativa das distâncias e o valor da relação unidade de medida por pixel.

Figura 41 – Bloco responsável pela obtenção da relação unidade/pixel



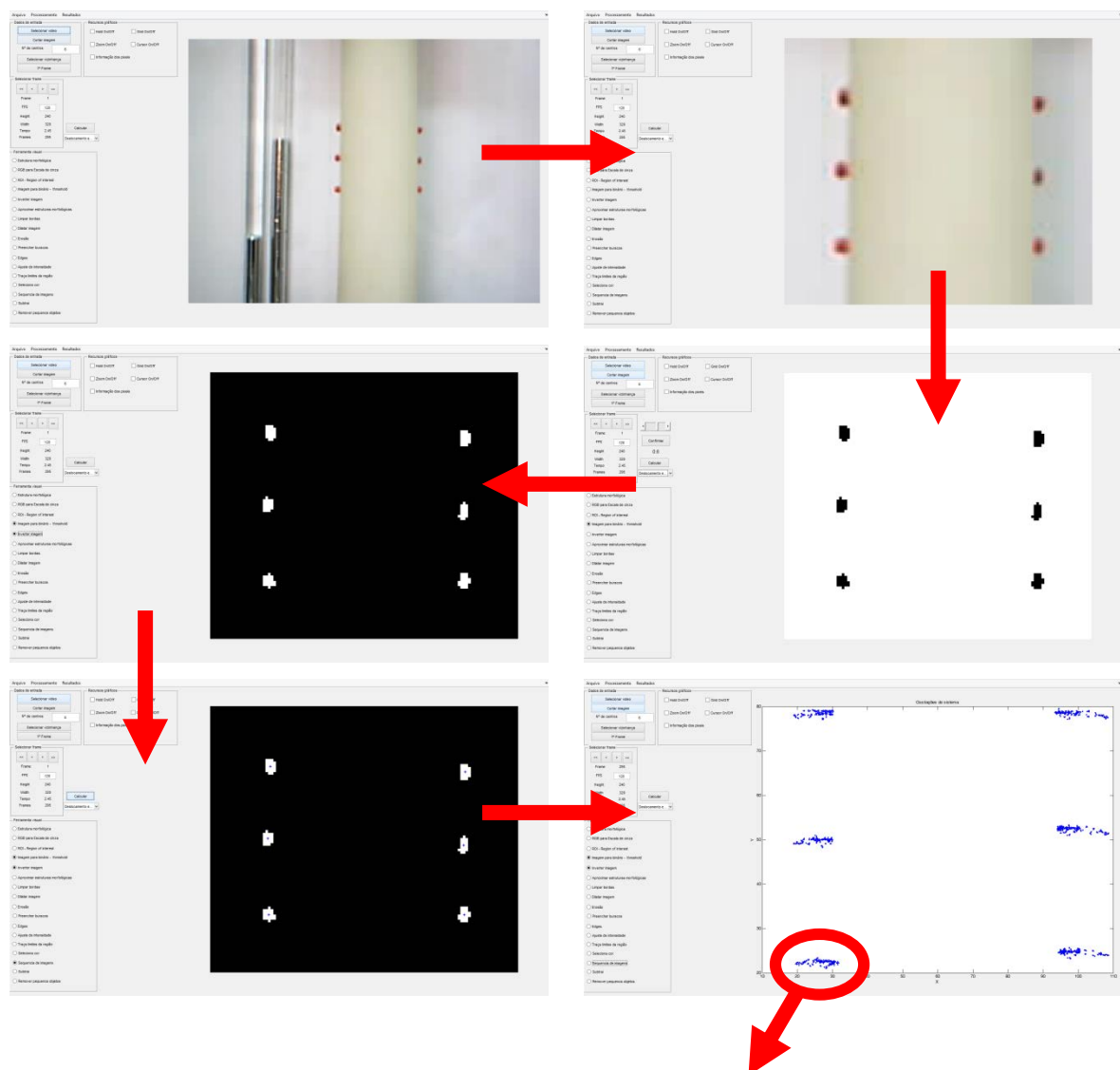
Fonte: Elaborado pelo autor.

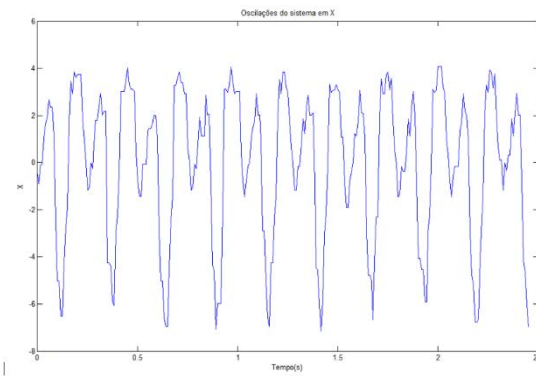
Com o valor da relação estimado é possível converter o deslocamento dado em pixel, obtido a partir do movimento de um alvo, para a unidade de medida desejada.

4.2.2 Obtenção do deslocamento do alvo

Para se obter o deslocamento do alvo, o processamento do vídeo do movimento é dividido basicamente em duas etapas. A primeira é utilizada para selecionar o arquivo de vídeo que será processado, cortar a imagem em uma região de interesse de forma que o tempo de processamento seja diminuído e alvos indesejados sejam retirados da cena e por fim, escolher o valor do campo de movimento do alvo de um quadro para o outro. A segunda etapa é a aplicação das ferramentas de processamento de imagem de segmentação e morfológicas a fim de extrair a posição do(s) alvo(s) na cena. Na Figura 42 é apresentada várias telas referente a cada passo de aplicações de ferramentas de segmentação em uma sequência de imagens, as quais são melhores discutidas abaixo.

Figura 42 - Uso de ferramentas de segmentação para extração das posições dos alvos





Fonte: Elaborado pelo autor.

Na primeira tela (tela a), é apresentado o primeiro quadro da sequência de imagens sem nenhuma alteração, o qual possui dois tubos de mercúrio e um tubo de látex com seis alvos (pontos em vermelho). O interesse nesta sequência de imagens é obter os deslocamentos dos seis alvos que estão no tubo de látex. No quadro seguinte (tela b), a imagem foi cortada na região de interesse, eliminando os tubos de mercúrio que se encontram ao lado do tubo de látex. Em seguida (tela c) é aplicada a ferramenta de limiar de corte (*thresholding*), onde todos pixels da imagem que possuem valores superiores aos estipulados pelo limiar de corte, se tornam brancos (binário = 1), e os pixels com valores inferiores tornam-se pretos (binário = 0). Na tela (d) a imagem é invertida a fim de permitir que o algoritmo rastreie os alvos corretamente, visto que o *software* faz uma varredura pela imagem buscando alvos brancos.

Uma vez identificado os alvos é calculado o centro de cada alvo (tela e) e finalmente, após a extração das posições dos alvos para cada quadro da sequência de imagens, obtém-se o deslocamento do alvo em função de pixels (tela f). Desta forma, o deslocamento do alvo para cada quadro do vídeo é obtido em função do tempo (taxa de aquisição) nas coordenadas X e Y (tela g). Uma vez obtido os deslocamentos nas coordenadas X e Y em pixels, basta multiplicar o sinal pela relação unidade/pixel encontrada para obter o deslocamento na unidade de medida real.

Os capítulos seguintes discutem a validação da metodologia e ferramentas implementadas neste *software* comparando a metodologia com sistemas de medição de referência, como paquímetro e micrômetro.

5 VALIDAÇÃO DA METODOLOGIA APLICADA A TESTES ESTÁTICOS E DINÂMICOS

Este capítulo busca avaliar a metodologia proposta através da comparação dos resultados obtidos nos testes com valores de referência (medidas padrão) como réguas, paquímetro, micrômetro e sinais de referência. Para tal foram realizados três experimentos distintos, o primeiro para demonstrar como o método se comporta na determinação da distância entre o alvo e a câmera, que fornece a relação unidade/pixel, o segundo busca avaliar o resultado de uma medida de deslocamento estático utilizando um micrômetro que sofre incrementos de passos de 0,5 mm e o último experimento realiza a medida de deslocamento de um alvo dinâmico e a compara com o sinal de referência.

5.1 Medida da distância entre a câmera e o objeto alvo

O objetivo deste experimento é encontrar a curva de resposta do método proposto para as distâncias estimadas, as quais variam da distância mínima à máxima que a câmera consegue focalizar um alvo, e em um segundo passo, analisar a relação unidade/pixel encontrada através da medição do tamanho de um alvo de dimensões conhecidas.

Para isto, foi impressa em uma folha de 50 cm de largura por 2 metros de comprimento, linhas paralelas a cada 10 mm na direção de seu comprimento, a qual foi colocada sobre uma mesa. Um dos extremos da folha ficou fixo à parede, onde foi fixado um papel cartaz de cor preta e dois alvos circulares de cor branca, um de 40 mm e outro de 180 mm de diâmetro. As linhas impressas na folha foram usadas como referência para o posicionamento da câmera a cada 10 mm e quando a câmera está posicionada corretamente uma imagem dos alvos é capturada. Este processo é realizado até que a câmera se aproxime ao máximo dos alvos e não possa mais focaliza-los. Na **Erro! Fonte de referência não encontrada.**⁴³ é apresentado o sistema experimental de medição.

Figura 43 – Sistema experimental de medidas de distâncias



Fonte: Elaborado pelo autor.

Após a aquisição de todas as imagens, as quais variaram de 90 à 1960 mm de distância da câmera ao alvo pequeno e de 180 à 1960 mm de distância da câmera ao alvo grande, o processamento dos dados consistiu em duas séries diferentes.

- Primeiro foi considerado que o alvo estava fixo à distância de 1960 mm da câmera, e as outras imagens que foram capturas aproximando a câmera dos alvos a cada incremento de 10 mm foram comparadas a primeira imagem, ou seja, h_1 é fixo e h_2 é variável;
- Posteriormente foi considerado que o alvo pequeno estava fixo à distância de 90 mm da câmera e o alvo grande a 180 mm (esta diferença é devido ao foco), e as demais imagens capturadas ao afastar a câmera dos alvos a cada incremento de 10 mm foram comparadas a estas primeiras imagens, deixando h_2 fixo e h_1 variável.

Na

44 é apresentada a câmera em uma das posições mais afastadas e em outra posição mais próxima ao alvo e as respectivas imagens capturadas do alvo grande para cada uma das posições da câmera.

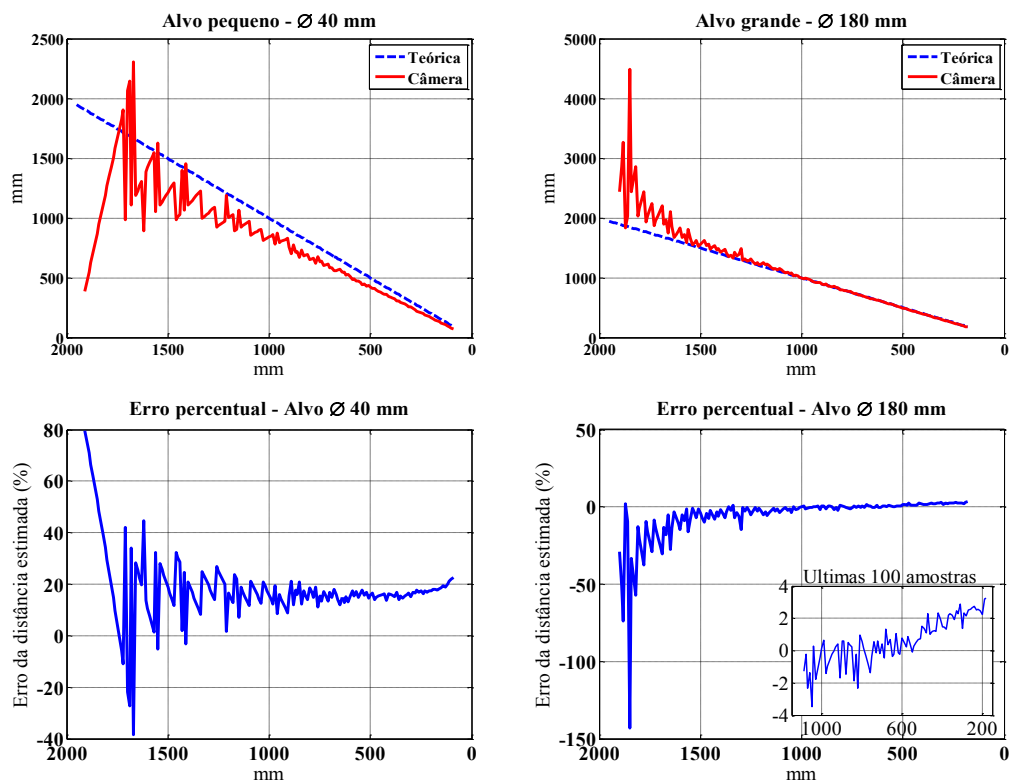
Figura 44 - Imagem mais distante e mais próxima à câmera.



Fonte: Elaborado pelo autor

Os resultados das distâncias estimadas para os deslocamentos da câmera da primeira série de dados (h_1 fixo e h_2 variável), bem como os respectivos erros em percentual, são apresentados na **Erro! Fonte de referência não encontrada.45**.

Figura 45 - Valores das distâncias estimadas para h_2 variável

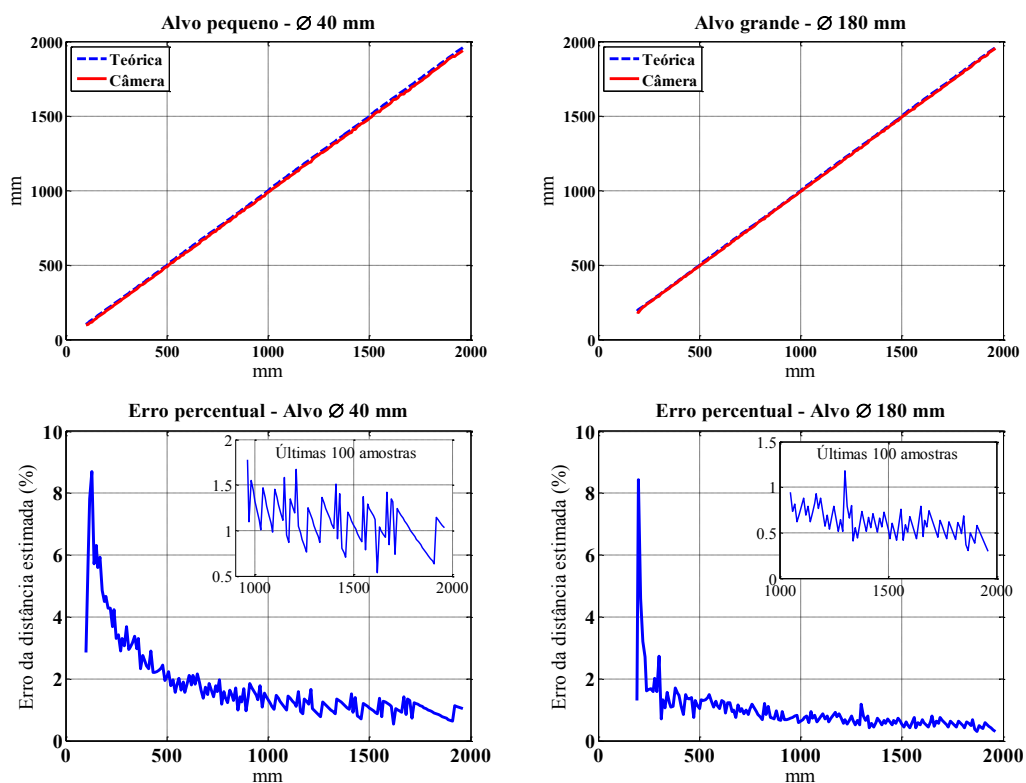


Fonte: Elaborado pelo autor

Pode-se notar que o alvo maior possui uma faixa de medida mais fiel aos valores corretos, uma vez que seus menores erros encontram-se na faixa de deslocamento em que a câmera está afastada a aproximadamente 1250 mm de distância do alvo até 180 mm (faixa confiável de deslocamento da câmera de aproximadamente 1070 mm), enquanto que as estimativas para o alvo pequeno mantêm-se mais fiéis na faixa de 700 mm de distância do alvo até 90 mm (faixa confiável de aproximadamente 610 mm).

Na **Erro! Fonte de referência não encontrada.46** são apresentadas as distâncias estimadas para a segunda série de dados, onde h_2 é fixo a uma distância de 90 mm para o alvo pequeno e 180 mm para o alvo grande e a posição h_1 vai se afastando do alvo a cada incremento de 10 mm até chegar a marca de 1960 mm de distância do alvo, e ilustrado também seus respectivos erros em percentual.

Figura 46 - Valores das distâncias estimadas para h_1 variável



Fonte: Elaborado pelo autor

Através da **Erro! Fonte de referência não encontrada.46** observa-se que o sentido do movimento da câmera adotado na segunda série de dados do experimento mostra bons resultados, sendo necessário visualizar os gráficos dos erros em percentual para melhor analisar os dados. Não se notam diferenças significativas que devem ser destacadas para comentários

entre os dois alvos de diâmetro diferentes, sendo assim, prossegue-se para as comparações entre as duas séries de dados.

Primeiro pode-se citar que a faixa de deslocamento da câmera é mais confiável para a segunda série de dados, visto que para ambos diâmetros dos alvos o maior erro foi pouco acima de 8% para poucos pontos de medida e o restante dos pontos demonstraram convergência e linearidade para os valores desejados.

Outro aspecto importante a ser observado é o máximo valor do erro. Na primeira série de dados, a disparidade dos resultados nas faixas não confiáveis de medida chegaram a 80% e 150% de erro para os alvos pequeno e grande, respectivamente, enquanto que na segunda série de dados obteve-se aproximadamente 8% de erro para ambos os diâmetros, inclusive, com a curva da resposta muito semelhante uma a outra, característica a qual não foi obtida na primeira série de dados. Para melhor verificar qual experimento obteve melhor resultado, foi calculado o valor RMS (valor eficaz) das últimas 100 amostras dos erros em porcentagem para as quatro situações. A representação do melhor resultado expresso em RMS, ao invés da média ponderada, foi escolhido em função de que os vários valores positivos e negativos obtidos na primeira série de dados podem se anular. Na Tabela 7 são apresentados os valores RMS das últimas 100 amostras de cada experimento.

Tabela 7 - Comparação das séries de medidas de distâncias.

RMS	Série 1		Série 2	
	Alvo pequeno 2,56 ⁽¹⁾	Alvo grande 1,51	Alvo pequeno 1,11	Alvo grande 0,62

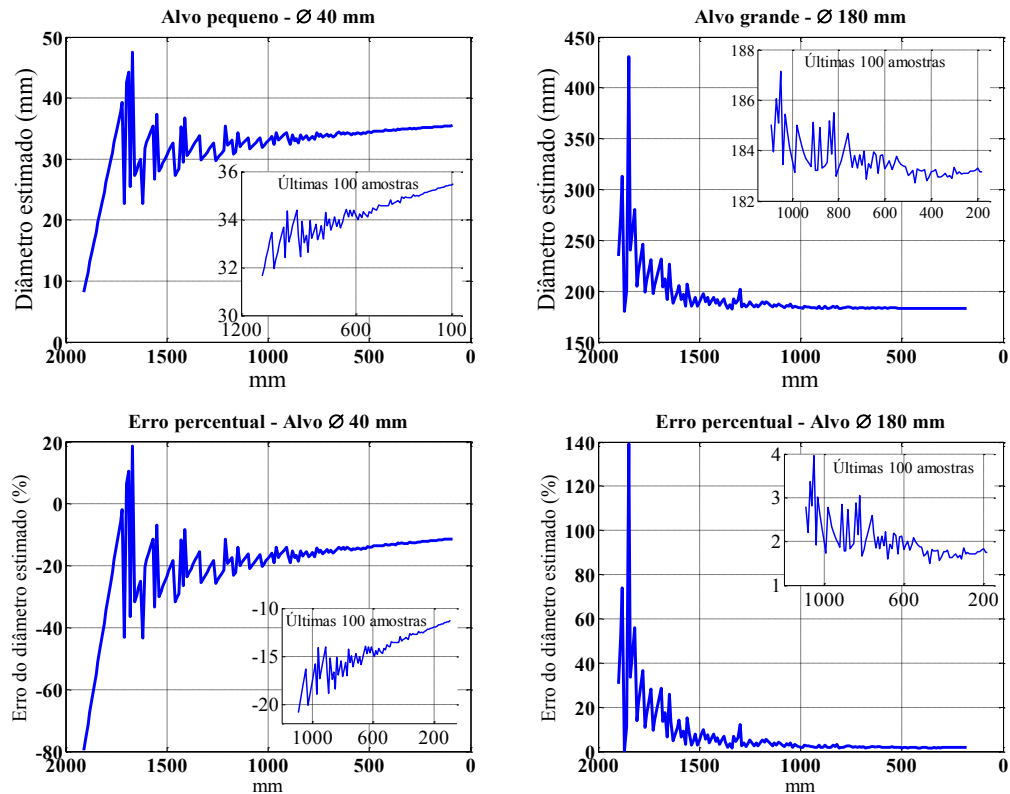
Fonte: Elaborada pelo autor

- (1) Devido a um erro sistemático nestes resultados, foi tirada a média das amostras. Sem esta correção o valor obtido é 16,32.

Uma última observação deve ser feita para esta análise de dados, em que nota-se que quanto mais distante do alvo a câmera se encontra, menor é a definição que se tem do alvo na imagem, o que acaba comprometendo os resultados das medições.

Na Figura 47 é apresentado o tamanho estimado do alvo para a primeira série de dados, onde considerou-se a posição da câmera em h_2 móvel e h_1 fixo a 1960 mm de distância do alvo e também os respectivos erros em porcentagem.

Figura 47 - Diâmetro do alvo estimado para h_1 fixo e erro percentual

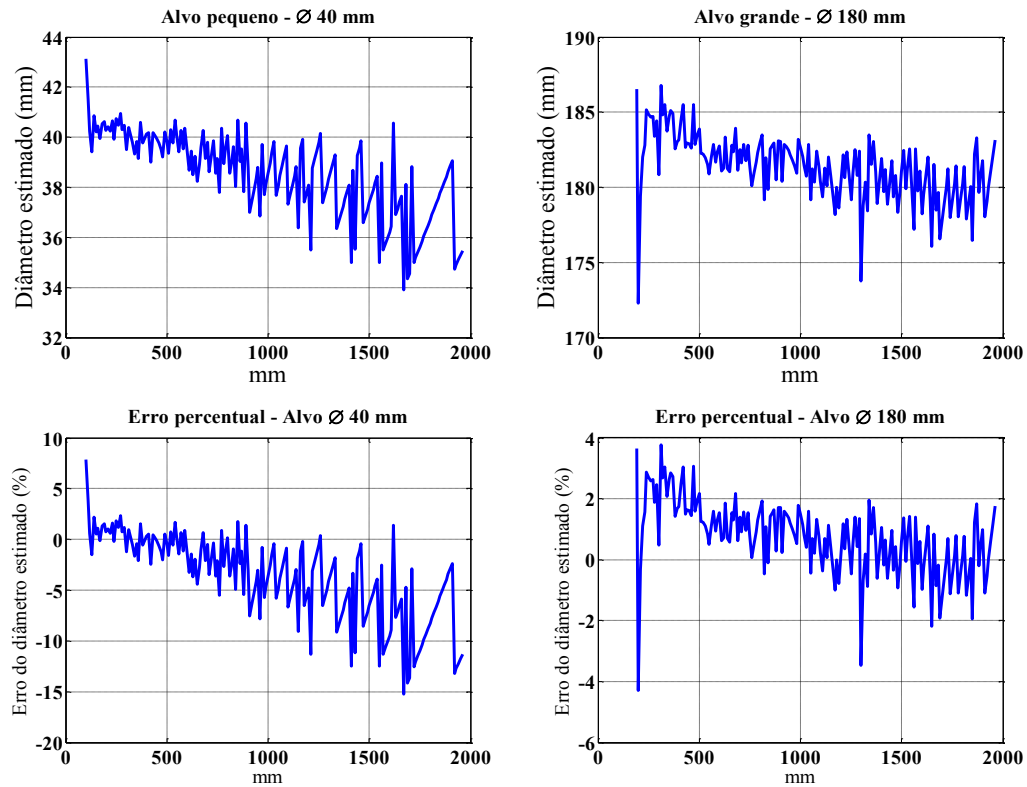


Fonte: Elaborado pelo autor

Os resultados da Figura 47, mais que os diâmetros estimados do alvo, representam a relação obtida unidade/pixel, que mostra que a faixa de deslocamento da câmera que produz resultados confiáveis é praticamente a mesma faixa confiável obtida para a estimativa das distâncias entre a câmera e os alvos.

Na Figura 48 é apresentado o tamanho estimado do alvo para a segunda série de dados, onde considerou-se a posição da câmera em h_1 móvel e h_2 fixo a 90 mm de distância do alvo para o alvo pequeno e a 180 mm para o alvo grande e também os respectivos erros em porcentagem.

Figura 48 - Diâmetro do alvo estimado para h_2 fixo e erro percentual



Fonte: Elaborado pelo autor

A fim de obter mais dados para comparações finais, na Tabela 8 são apresentados os valores RMS obtidos através dos valores das amostras dos erros percentuais do diâmetro dos alvos da primeira e segunda série de dados.

Tabela 8 - Comparações entre as séries das medidas dos diâmetros dos alvos

	Série 1 (100 amostras)		Série 2 (100 amostras)		Série 2 completa	
	Alvo pequeno	Alvo grande	Alvo pequeno	Alvo grande	Alvo pequeno	Alvo grande
RMS	2,24 ⁽¹⁾	2,06	7,28	0,97	5,60	1,40

Fonte: Elaborado pelo autor.

- (1) Devido a um erro sistemático nestes resultados, foi tirada a média das amostras. Sem esta correção o valor obtido é 14,78.

Pode-se observar através da **Erro! Fonte de referência não encontrada.48** e dos valores na Tabela 8 que, primeiramente, em todos experimentos as piores estimativas são representadas pelo alvo pequeno, o que pode ser justificado pela quantidade do número insuficiente de pixels que representam o objeto na imagem.

Considerando então, somente os dados obtidos pelas estimativas do alvo grande, nota-se mais uma vez que, a direção do deslocamento da câmera proposta na segunda série de dados (fixando a câmera em h_2 e afastando a câmera para uma distância h_1) melhor representa os valores reais.

Na Tabela 8 é apresentado nas duas últimas células o valor RMS para todas as amostras da segunda série de dados, a fim de possibilitar a comparação entre a segunda série de dados completa e apenas a faixa confiável da primeira série de dados. Pode-se notar que, o valor RMS obtido na segunda série de dados para o alvo grande continua sendo menor que o valor obtido na primeira série de dados do alvo grande, o que demonstra grande vantagem em utilizar o método empregado na segunda série de dados.

5.1.1 Algumas considerações a respeito da determinação da distância estimada entre a câmera e o alvo e do valor estimado da relação unidade/pixel

O ponto mais crítico analisado nos resultados e que merece devida atenção refere-se à baixa definição que o alvo apresenta nas imagens de longa distância.

Como será mostrado a seguir, a definição do alvo na imagem pode comprometer seriamente os dados obtidos, foi o que ocorreu para a primeira série de dados. Por exemplo, tomando um alvo fixo de 40 mm de diâmetro à uma distância h_1 da câmera de 500 mm e a uma posição h_2 da câmera de 30 mm, Δh de 470 mm, e sabendo que foi encontrado o valor de 407 pixels para a posição da câmera h_2 e 34 pixels para a posição da câmera h_1 , a distância estimada para h_1 é apresentada na Equação 25, utilizando a Equação (19).

$$h_1 = \frac{407 \times 470}{407 - 34} - 10,64 = 502,20 \text{ mm} \quad (135)$$

Este resultado apresenta um erro de 0,4%. Agora supondo que o valor do número de pixels encontrado na posição h_1 foi uma unidade menor e maior, os resultados são apresentados nas Equações 26 e 27.

$$h_1 = \frac{407 \times 470}{407 - 33} - 10,64 = 500,80 \text{ mm} \quad (146)$$

$$h_1 = \frac{407 \times 470}{407 - 35} - 10,64 = 503,50 \text{ mm} \quad (157)$$

Os resultados apresentam uma variação de 0,16% de erro para a Equação 26 e 0,7% de erro para a Equação 27.

Estas variações do número de pixels demonstram que para um único pixel alterado pode-se comprometer seriamente os resultados da estimativa da distância. Neste exemplo, o erro da Equação 27 quase dobrou relacionado à Equação 25 e é quase 5 vezes maior se comparado a Equação 26, no entanto, para valores com distâncias maiores este erro pode ser muito maior. Por exemplo, para o mesmo alvo, agora situado a uma distância de 1100 mm da câmera na posição h_1 e 1010 mm na posição h_2 , variação Δh de 90 mm, e número de pixels encontrados de 15 e 16 para a posição h_1 e h_2 respectivamente, então se obtém o seguinte resultado apresentado na Equação 28.

$$h_1 = \frac{16 \times 90}{16 - 15} - 10,64 = 1429,36 \text{ mm} \quad (168)$$

Um erro de 29,9% é encontrado para este caso e alterando um pixel para mais e para menos neste mesmo sistema, obtém-se os resultados nas Equações 29 e 30.

$$h_1 = \frac{17 \times 90}{17 - 15} - 10,64 = 754,36 \text{ mm} \quad (179)$$

$$h_1 = \frac{15 \times 90}{15 - 15} - 10,64 = \textit{infinito} \quad (30)$$

É encontrado um erro de 31,42% quando existe um pixel a mais e a distância tende ao infinito quando existe um pixel a menos. A fim de evitar estes erros é de suma importância ter um alvo muito bem definido na imagem, que se consegue com o uso de uma lente adequada para a distância que se pretende medir ou posicionando a câmera a uma distância correta de foco e não exagerando no deslocamento da mesma.

Observa-se também que os melhores resultados para as distâncias entre a câmera e o objeto foram obtidos com a distância da câmera fixa próxima ao alvo e variando as distâncias da câmera na posição h_1 , isto se deve pela boa definição que é obtida do alvo nestas posições mais próximas. Com uma boa definição do alvo na imagem, deve-se analisar qual será o melhor deslocamento da câmera para obter o valor da distância, visto que para pequenos deslocamentos (até aproximadamente 200 mm) os resultados não foram satisfatórios como para os deslocamentos maiores.

Como visto nas figuras deste capítulo, existe uma certa variação aplicada à câmera que melhor representa os valores reais do sistema que foram estimados. De acordo com a **Erro! Fonte de referência não encontrada.**⁴⁶ (valores das distâncias estimadas para h_l variável) visualiza-se que para o erro ser menor que 1%, os melhores deslocamentos que podem ser aplicados à câmera são os valores superiores a aproximadamente 1000 mm para o alvo grande e aproximadamente 1500 mm para o alvo pequeno, onde o limite do deslocamento é dado pela definição do alvo na imagem.

Analizando a Figura 46 e notando no aspecto que a partir do valor da distância entre a câmera e o objeto de 600 mm os valores dos erros estimados são muito próximos a 0, era de se esperar que o tamanho estimado do alvo a partir de 600 mm fosse muito próximo do real (pequeno - 40 mm e grande - 180 mm), no entanto, nota-se na Figura 48 que a partir deste valor, os resultados começam a divergir para o alvo pequeno e a convergir para o alvo grande. Isto ocorre pelas relações existentes entre a distância focal calculada, o ângulo de visão estimado e a distância estimada entre a câmera e o objeto.

Voltando para a Equação 20, onde é estimado o valor do comprimento do fundo da imagem, o resultado é obtido através da distância focal, do ângulo de visão e da distância estimada entre a câmera e o objeto. Analisando primeiramente a origem do valor da distância focal, Tabela 2, vê-se que este valor é obtido pela transformação equivalente dos valores apresentados na tela LCD da câmera no formato de filme 35 mm. Os valores dos ângulos de visão são estimados através da Equação 5 utilizando os valores de distância focal calculados na Tabela 2 e as dimensões do sensor apresentados na Tabela 1 e por último, o fator multiplicativo da relação unidade/pixel, Equação 21, é obtido através da razão entre o comprimento do fundo da imagem e o número máximo de pixels em linhas ou colunas.

Deve-se considerar que os desvios ocorridos na estimativa do tamanho do alvo se devem aos erros nas estimativas dos itens citados acima, além da definição do objeto na imagem.

5.2 Medida de deslocamento estático

Para validar as medidas realizadas através do sistema utilizando a câmera digital, foram feitas medidas estáticas utilizando como referência (padrão) um micrômetro com o alvo fixo em sua haste.

O objetivo deste teste é realizar uma série de medidas, utilizando deslocamentos conhecidos e comparar os resultados. Neste caso, foi utilizado como padrão um micrômetro,

sendo que para cada incremento de deslocamento controlado pelo micrômetro de 0,5 mm é feita uma captura da imagem e, posteriormente, a sequência de imagens é processada e analisada.

O micrômetro utilizado é da marca *Mitutoyo* com resolução de 0,002 mm e cada revolução do tambor equivale a 0,5 mm. Na Figura 49 é apresentado o sistema de medição.

Figura 49 – Sistema de medição com micrômetro para testes estáticos



Fonte: Elaborado pelo autor.

Foram feitos alguns testes preliminares com distâncias h_1 e h_2 diferentes, a fim de obter a distância entre câmera e alvo que melhor representa os resultados corretos e verificar o quão próximo dos resultados as outras medidas seriam. Os diâmetros estimados são apresentados na **Erro! Fonte de referência não encontrada.9** para um alvo de 40 mm de diâmetro.

Tabela 9 – Diâmetros estimados para diferentes distâncias

Medidas (mm)			h_2		
			20	40	60
h_1	500	θ alvo estimado	38,99	38,15	38,1
	400		40,19	39,1	39,12
	300		40,9	39,49	39,5
	230		41,92	39,9	40,05

Fonte: Elaborado pelo autor

Como pode ser visto na Tabela 9, o melhor valor estimado para as posições h_1 e h_2 da câmera é para h_1 igual a 230 mm e h_2 igual a 60mm, onde foram obtidos os valores estimados do diâmetro do alvo de 40,05 mm com um erro percentual do diâmetro do alvo de 0,12%.

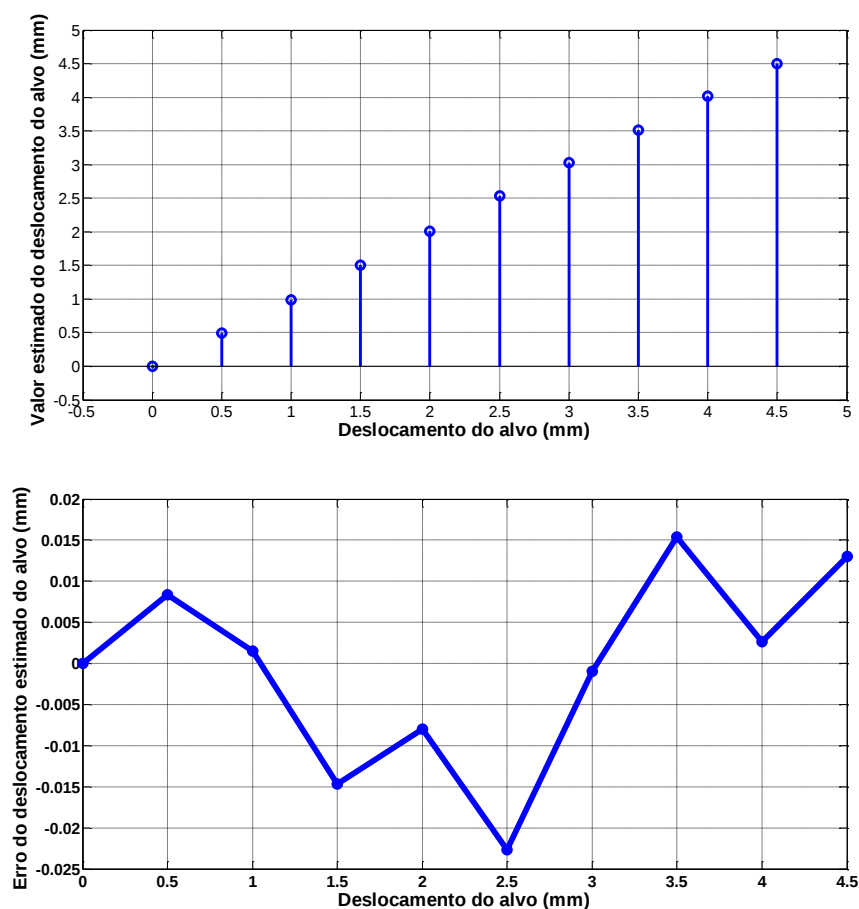
Os resultados para a distância h_2 de 20 mm não são levados em consideração nesta análise, visto que a imagem não estava bem focada, podendo então, comprometer os resultados do sistema de medição.

O pior resultado (desconsiderando os valores para a distância $h_2 = 20$ mm) foi para a distância h_1 de 500 mm e distância h_2 de 60 mm, com um erro de 1,9 mm que corresponde à 4,75% de erro.

Conhecendo as distâncias que melhor representam os valores reais, utilizou-se o micrômetro com um alvo na ponta da haste para medir os deslocamentos incrementados pelo mesmo.

Após processada as imagens e extraída as posições do alvo na cena em cada imagem, foi possível fazer a diferença entre estas posições e a posição inicial do alvo, de forma a obter o deslocamento total em cada ponto devido aos incrementos dos deslocamentos no micrômetro. Na **Erro! Fonte de referência não encontrada.50** são apresentados os valores dos incrementos obtidos com o método proposto e o erro do valor estimado comparado ao valor real.

Figura 50 - Incremento estimado do deslocamento do alvo na haste do micrômetro em passos de 0,5 mm e o erro do valor estimado



Fonte: Elaborado pelo autor

Pode-se observar que os valores estimados para passos de 0,5 mm foram muito próximos aos valores reais, com variação máxima de 0,88% no incremento de 2,5 mm. Desta forma, prossegue-se então para a análise de alvos dinâmicos, visto que até agora, para uma faixa confiável de deslocamento da câmera, os erros não ultrapassam 2%.

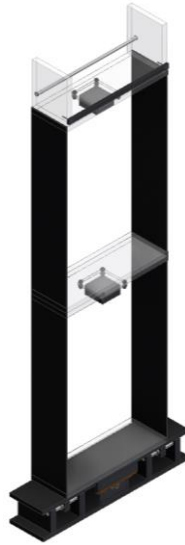
5.3 Medida de deslocamento dinâmico

Neste tópico é avaliada a capacidade da metodologia medir variações dinâmicas de um dado alvo, para isso a metodologia foi aplicada à medida de deslocamento da base de um modelo de um prédio em escala reduzida de dois pavimentos e o resultado foi comparado com o valor de referência utilizado para controlar o movimento do prédio. O sistema de controle do prédio consiste essencialmente de um controlador proporcional-derivativo (PD), sensor e atuador e os correspondentes condicionadores. Este sistema permite simular uma condição de vibração do prédio em que o sinal de excitação é enviado para o atuador (motor elétrico de corrente contínua) na base do prédio, replicando o sinal gerado pelo controlador e fazendo o prédio vibrar de acordo com a excitação, e o sensor (encoder) recebe a resposta do atuador na forma de posição.

5.3.1 Estrutura do prédio de dois andares

O experimento foi conduzido em uma estrutura de um prédio em escala reduzida de dois andares que pode sofrer uma excitação em sua base controlada para simular e avaliar diferentes condições de vibrações de um prédio. A estrutura (Figura 51) é produzida pela *Quanser Consulting Inc* e tem 1125 mm de altura, com cada coluna sendo de aço com uma seção de 1,75 x 108 mm. A massa total é de 4,52 kg, onde a massa do primeiro andar é 1,16 kg, a massa do segundo é 1,38 kg.

Figura 51 - Modelo do prédio de dois andares



Fonte: Abreu e Lopes Junior (2010).

Um módulo de potência universal é usado como amplificador de energia para energizar o sistema. A aquisição de dados e placa de controle utilizadas para coletar os dados e controlar o sistema é uma placa MultiQ-PCI, a qual realiza a aquisição de dados de no máximo 10 segundos.

5.3.2 Aparato experimental

O Sistema de medição inclui uma câmera digital, que foi colocada perpendicularmente à frente do prédio fixada em um tripé, um ponto de iluminação atrás da câmera, para melhorar a filmagem e a estrutura do prédio (Figura 52a).

A fim de comparar o método proposto em uma situação de excitação dinâmica, a estrutura do prédio recebeu em sua base, no local onde é aplicada a excitação do sistema, uma etiqueta adesiva com a finalidade de facilitar a extração do movimento deste ponto (Figura 52b).

Figura 52 - Sistema para medição do prédio



(a)



(b)

Fonte: Elaborado pelo autor

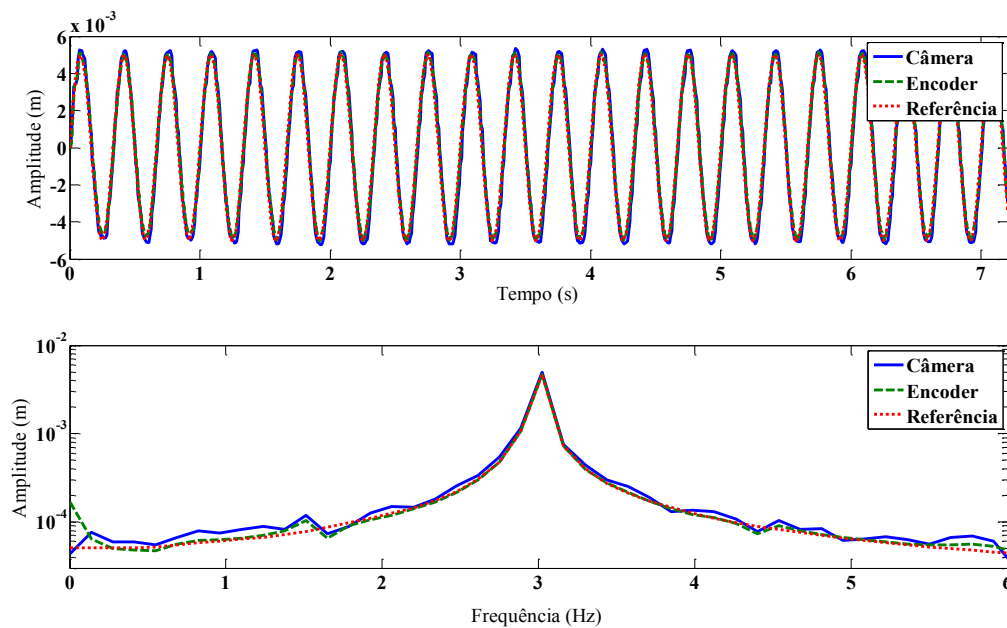
A câmera foi posicionada adequadamente para capturar todo o prédio e acionada para iniciar a gravação e então a estrutura foi excitada. A taxa de aquisição das imagens foi de 120 quadros por segundo (qps) na resolução de 640x480.

5.3.3 Medida de deslocamento da excitação na base do prédio

O sinal medido foi comparado com o sinal de excitação aplicado ao sistema de vibração objetivando validar a qualidade do processo de medição utilizando uma câmera. O sinal de referência do controlador, assim como, o sinal do encoder (leitura da posição do atuador - motor) são valores conhecidos que foram utilizados para comparação com o sinal medido com a câmera.

Primeiramente foi aplicado à base do prédio um sinal senoidal de 3 Hz e pode-se visualizar o resultado na Figura 53, onde são sobrepostos os sinais de referência enviado para o motor elétrico, o sinal de resposta do motor, o qual foi lido pelo encoder e o sinal medido pela câmera, e também são apresentados seus respectivos espectros na frequência. Na Tabela 10 é apresentada uma comparação quantitativa dos sinais.

Figura 53 - Comparação entre o sinal de referência e os sinais medidos no domínio do tempo e no domínio da frequência.



Fonte: Elaborado pelo autor

Tabela 10 - Valores RMS do sinal senoidal

	RMS
Referência	0,0035
Encoder	0,0035
Câmera	0,0036

Fonte: Elaborado pelo autor

Com estes resultados obtém-se um erro de aproximadamente 2,8% entre o sinal da câmera e os demais, isto é devido, primeiramente pelo fato de que o ponto medido na base do prédio pela câmera não é o mesmo ponto medido pelo encoder, pois o ponto medido pela câmera está após um sistema de engrenagem-cremalheira, o qual possui pequenas folgas mecânicas que podem resultar em medidas diferentes. Em segundo caso, o encoder mediu a tentativa do motor elétrico acompanhar o sinal de referência, não necessariamente reproduzindo exatamente o mesmo sinal de excitação, mas pelos resultados mostrados na Figura 53 e na Tabela 10 observa-se que realmente houve excitação no sistema segundo o sinal de excitação gerado.

O fator de correção encontrado, unidade/pixel, contém erros de estimativa de distância focal e ângulo de visão da câmera, os quais são influenciados pela resolução da câmera, então para câmeras com maiores resoluções o sistema terá maior precisão nos resultados. Nestes testes, os erros obtidos pelas medições foram considerados suficientemente pequenos, apontando que os parâmetros discutidos acima foram estimados adequadamente. Então, após a análise dos resultados e validação da metodologia, o sistema foi preparado para medir a vibração de vários alvos simultaneamente em um prédio.

5.4 Algumas considerações a respeito dos testes realizados neste capítulo

Após a análise da série de resultados dos testes realizados neste capítulo, observou-se que para as medidas de distância entre a câmera e o alvo os resultados são melhores representados para os dados em que as distâncias foram estimadas com h_2 fixo e variando a distância h_1 , no entanto, isto não deve ser levado como regra, pois as curvas de respostas obtidas para as distâncias entre alvo e câmera com h_1 fixo mostraram boa concordância em uma determinada faixa de deslocamento da câmera, isto ocorreu principalmente por causa da melhoria na definição do alvo existente na imagem devido à aproximação da câmera ao alvo, ou seja, em uma medição em que o alvo está bem focado, tanto quando a câmera se encontra mais próxima ou mais afastada, e possui um número significativo de pixels para representá-lo na imagem, a medida obtida fornecerá um valor muito próximo ao real, podendo considerar então, o erro percentual levantado para aquele deslocamento aplicado à câmera.

Agora, considerando os dados referentes ao diâmetro estimado do alvo, observa-se a grande disparidade que ocorre nas estimativas tanto para h_1 fixo quanto para h_2 fixo. Duas características importantes a se notar nestes dados são as seguintes:

O que se espera é que quanto mais precisa for a estimativa da distância entre a câmera e o alvo, melhor seja a estimativa do tamanho do alvo, no entanto isto não ocorreu devido a vários fatores já discutidos na seção 6.1.1, e outro aspecto importante de se notar nesta questão, é que a diferença do erro percentual entre os dados de h_1 fixo e os de h_2 fixo deixa claro que para se obter o menor erro deve-se realizar as medidas com h_2 fixo. O teste de medida estática com o micrômetro mostrou bons resultados, visto que o maior erro foi de aproximadamente 0,9%.

Por fim, o método foi aplicado em uma estrutura de um prédio laboratorial em escala reduzida de dois andares que teve sua base excitada com um sinal de referência para posterior comparação ao sinal medido com o método proposto e o resultado mostrou-se muito próximo.

6 ANÁLISE MODAL DE UM PRÉDIO EM ESCALA REDUZIDA

A Análise Modal Experimental é uma das principais técnicas utilizadas para o estudo e análise dinâmica de sistemas estruturais. A estimativa dos parâmetros dinâmicos estruturais do modelo são requisitos necessários para a avaliação do comportamento operacional, do desempenho, bem como, dos índices de segurança das estruturas.

Na sua formulação clássica, a técnica permite estudar o comportamento dinâmico estrutural do modelo através de uma formulação matricial, que permite estabelecer uma relação direta entre a resposta e a excitação (relação entrada-saída) da estrutura. Neste caso, a Função de Resposta em Frequência (FRF) da estrutura obtida a partir da excitação e da resposta da estrutura medidas em um conjunto de pontos é utilizada para a identificação dos parâmetros modais do modelo. Isso, portanto, demanda a medição não só da resposta, mas também da excitação do modelo o que, em muitas situações reais, é uma limitação principalmente devido às dificuldades de medição da excitação ou mesmo as próprias dificuldades para excitar a estrutura. Por exemplo, no caso de grandes estruturas como pontes, torres, é difícil excitar a estrutura, já no caso de estruturas muito sensíveis a aplicação de uma excitação externa poderia danificar ou alterar o comportamento da mesma. Nestes casos, uma alternativa seria a análise do comportamento do modelo utilizando apenas as respostas, ou seja, as técnicas de análise modal com base apenas na resposta.

As técnicas de análise modal com base apenas nas respostas permitem a obtenção dos parâmetros modais do modelo utilizando apenas as respostas, que possibilita, em determinadas situações, que a estrutura seja excitada naturalmente inclusive a partir das próprias condições de operação da estrutura. Neste contexto, a metodologia de medição utilizando câmeras digitais proposta neste trabalho aparece como uma opção natural e, portanto, a sua aplicação para análise modal experimental deve ser analisada. A técnica poderia ser aplicada, não só para a análise modal convencional com base na relação entrada-saída, mas também para análise modal com base apenas nas respostas obtidas a partir de excitação externa ou das condições reais de operação da estrutura.

A aplicação da metodologia de medidas de deslocamento com camera digital para análise modal é discutida neste capítulo. A metodologia foi utilizada para medição das respostas em deslocamento da estrutura de um prédio em escala reduzida e os dados foram utilizados para obtenção dos parâmetros modais do modelo. Os parâmetros foram estimados utilizando uma

técnica de análise modal com base apenas na resposta do modelo, mais especificamente, a técnica de Identificação Estocástica de Subespaços (IES).

6.1 Análise Modal Experimental

Análise Modal Experimental é uma das principais técnicas utilizadas para a análise dinâmica de sistemas estruturais. Em sua formulação clássica, (EWINS, 1984; MAIA, 2001; RAO, 2008) o comportamento dinâmico estrutural do modelo é estudado com base nas relações entradas – saídas da estrutura obtidas experimentalmente. Neste caso, os parâmetros modais do modelo são estimados a partir dessas relações e para isso pode ser utilizado uma vasta gama de métodos e algoritmos. Os testes experimentais devido à necessidade de se medir a excitação e a resposta do sistema, geralmente são realizados em laboratório, em condições de ensaio bem controladas. Entretanto, o comportamento dinâmico de uma estrutura em condições de operação, por exemplo um veículo em uma pista, pode apresentar um comportamento estrutural diferente da situação de um teste de laboratório. Devido a efeitos de pretensão, suspensão, condições ambientais e também pela própria dificuldade de se produzir a excitação imposta à estrutura, os resultados podem apresentar grandes discrepâncias.

As técnicas de análise modal baseadas apenas nas respostas vem ao encontro dessas limitações, ou seja, elas permitem a obtenção dos parâmetros modais a partir apenas das respostas do modelo. Isso pode levar a uma análise do modelo a partir das próprias condições de operação da estrutura. Neste caso, diferentemente da abordagem clássica, são utilizados apenas os dados referentes as respostas medidas e a excitação não necessita ser obtida.

Os métodos e técnicas de análise modal com base apenas na resposta são formulados tanto no domínio do tempo quanto no domínio da frequência. No domínio da frequência um dos mais destacados é o método de Decomposição no Domínio da Frequência - DDF (BRINCKER, 2000). No domínio do tempo os métodos de identificação se estendem numa grande gama de métodos e técnicas, sendo que uma das principais técnicas de identificação utilizada é a de Identificação Estocástica de Subespaço - IES (VAN OVERSCHEE; DE MOOR, 1996; PEETERS; ROECK, 1999).

A utilização e o desenvolvimento de algoritmos com base na IES tem sido discutida em vários trabalhos (BRINCKER; ANDERSEN, 2006; CAMARGO; JACOBSEN; STRAFACCI, 2011). No âmbito local, o orientador vem atuando em várias atividades de pesquisa no campo da análise modal com base apenas na resposta que são desenvolvidas junto a Área de Mecânica dos Sólidos do Departamento de Engenharia Mecânica da FEIS (Faculdade de Engenharia de

Ilha Solteira), Grupo de Materiais e Sistemas Inteligentes (GMSINT). Essas atividades já produziram algumas publicações e dissertações de mestrado. Dentre estas está o estudo e implementação de uma metodologia utilizando a Decomposição no Domínio da Frequência (BORGES, 2006) e uma metodologia utilizando a Identificação Estocástica de Subespaço (NUNES JÚNIOR, 2006; FREITAS, 2008) e, mais recentemente, um trabalho utilizando materiais piezelétricos como sensores para análise modal (PRAZZO, 2011). Inclui ainda, um *software* denominado OEMA que foi desenvolvido e implementado em ambiente Matlab integrando técnicas de identificação no domínio do tempo e da frequência.

Neste capítulo, a técnica de medidas de deslocamento utilizando câmeras digitais é avaliada para aplicação na análise modal de estruturas com base apenas na resposta da estrutura. A utilização do método de medida neste caso poderia representar uma alternativa bastante atrativa, visto que, as câmeras podem medir a resposta da estrutura, tanto em pontos isolados (medidas pontuais) que é uma característica dos principais sensores convencionais, bem como em um conjunto de pontos simultaneamente ou mesmo em uma área ou região do modelo, o que seria difícil com sensores do tipo acelerômetros.

Para a identificação dos parâmetros modais do modelo será utilizado um módulo do *software* OEMA contendo o método Identificação Estocástica de Subespaços - IES.

6.1.1 Princípios básicos da Identificação Estocástica de Subespaço - IES

Os métodos baseados na Identificação Estocástica de Subespaço executam primeiramente uma redução do conjunto de estados do sistema e o modelo em espaço de estado é identificado a partir do subconjunto encontrado. A terminologia subespaço surgiu na teoria de controle (KUNG, 1978) e define o grupo de métodos que compõe a classe de problema denominada estocástica. Este grupo está relacionado com a realização determinística que retrocede ao algoritmo de Ho-Kalman e aplica a Decomposição em Valores Singulares (DVS) para o tratamento de sinais contaminados por ruído.

A técnica de Identificação Estocástica de Subespaço (IES) - (VAN OVERSCHEE; DE MOOR, 1996) – é um método que vem se consolidando na área de análise modal, sendo bastante indicado para identificação de sistemas usando somente dados de resposta. O método identifica um modelo estocástico em espaço de estados a partir dos dados medidos da resposta do modelo. O modelo em espaço de estados é formulado e resolvido usando formulação de espaço de estados discreto (OGATA, 1987), Equações 31 e 32.

$$x_{k+1} = A_d x_k + B_d u_k \quad (31)$$

$$y_k = C_d x_k + D_d u_k \quad (32)$$

Nas expressões (31) e (32) x_{k+1} é um vetor de ordem $N \times 1$ correspondente ao vetor de estado do processo no tempo discreto $k+1$ que contém os valores numéricos dos N estados.

A matriz A_d representa a matriz de estado que descreve a dinâmica do sistema e tem ordem $N \times N$, sendo N duas vezes o número de graus de liberdade do sistema;

B_d a matriz de entrada, de ordem $N \times m$, sendo m o número de entradas;

C_d a matriz de saída, de ordem $l \times m$, sendo l o número de saídas;

D_d a matriz de transmissão direta, de ordem $l \times m$;

x_k o vetor de estado;

u_k o vetor de entrada, assumindo características aleatórias;

y_k o vetor de saída dado por um estado ou combinação linear dos estados do sistema;

Na prática sempre existe incertezas no modelo, associados com o ruído no processo e na medida. Se os componentes estocásticos do ruído do processo, w_k , e de medidas, v_k , são incluídos nas Equações 31 e 32, o modelo do sistema discreto pode ser redefinido incluindo estas incertezas, Equações 33 e 34.

$$x_{k+1} = A_d x_k + B_d u_k + w_k \quad (318)$$

$$y_k = C_d x_k + D_d u_k + v_k \quad (319)$$

O ruído está presente devido aos distúrbios e erros do modelo, assim como, devido as incertezas das medidas do sensor. A determinação correta da característica de cada componente individual do ruído é difícil. Então, faz-se necessário algumas suposições, neste caso, é assumido que as componentes de ruído, embora não medidas, tem a média nula e a matriz de covariância é dada pela Equação 35:

$$E \left[\begin{pmatrix} w_p \\ v_p \end{pmatrix} \begin{pmatrix} w_q^T & v_q^T \end{pmatrix} \right] = \begin{pmatrix} Q & S \\ S^T & R \end{pmatrix} \delta_{pq} \quad (320)$$

Onde E é o operador esperança e δ_{pq} é o delta de Kronecker.

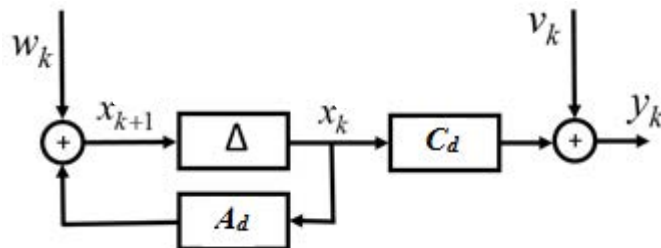
As sequências w_k e v_k são assumidas independentes uma da outra. No caso em que a estrutura seja excitada por uma excitação natural (condições de operação) e somente as respostas da estrutura são medidas (entrada, u_k , não medida) não é possível distinguir a entrada u_k dos termos de ruído w_k e v_k nas equações. Se a entrada é aleatória com característica tipicamente de um ruído branco, então, a entrada u_k pode ser modelada implicitamente pelos termos de w_k e v_k , resultando em um sistema puramente aleatório, Equações 36 e 37

$$x_{k+1} = A_d x_k + w_k \quad (321)$$

$$y_k = C_d x_k + v_k \quad (37)$$

Na Figura 54 é mostrado esquematicamente um modelo estocástico linear, invariante no tempo, com saídas y_k , e estados x_k descritos pelas matrizes A_d e C_d e as matrizes de covariância Q , S e R juntamente com os termos de ruídos w_k e v_k , descrito pelas equações. O símbolo Δ representa um atraso.

Figura 54 - Representação do modelo em espaço de estados estocástico



Fonte: Adaptado de Van Overschee e De Moor (1996)

Na Identificação Estocástica de Subespaços os dados de saída medidos, y_k , são agrupados na forma de uma matriz de blocos de Hankel H . A matriz de Hankel H_y é construída a partir dos dados de saída. Neste caso, a matriz H_y possui um importante papel nos algoritmos de identificação de subespaço, pois é nela que os dados da saída do sistema ficam agrupados. A matriz de Hankel H_y é definida em termos das saídas “passadas” (Y_p) e saídas “futuras” (Y_f), Equação (38).

$$H_y = Y_{0|2i-1} \stackrel{def}{=} \frac{\overbrace{\begin{pmatrix} y_0 & y_1 & \cdots & y_{j-1} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ y_{i-2} & y_{i-1} & \cdots & y_{i+j-3} \\ y_{i-1} & y_i & \cdots & y_{i+j-2} \end{pmatrix}}^j}{\underbrace{\begin{pmatrix} y_i & y_{i+1} & \cdots & y_{i+j-1} \\ y_{i+1} & y_{i+2} & \cdots & y_{i+j} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ y_{2i-1} & y_{2i} & \cdots & y_{2i+j-2} \end{pmatrix}}^i} \stackrel{def}{=} \begin{pmatrix} Y_p \\ Y_f \end{pmatrix} \quad (38)$$

ou

$$H_{y=Y_{0|2i-1}} \stackrel{def}{=} \begin{pmatrix} Y_{0|i-1} \\ Y_{i|2i-1} \end{pmatrix} \stackrel{def}{=} \begin{pmatrix} Y_p \\ Y_f \end{pmatrix} \quad (39)$$

O número de blocos de linhas (i) é um parâmetro definido pelo usuário. Teoricamente seu valor deve ser maior que o maior índice de observabilidade, mas como no entanto esse índice é desconhecido assume-se que i deve ser maior que a ordem do sistema que se deseja identificar.

O número de colunas (j) é usualmente igual a $s - 2i + 1$, sendo s o número de pontos dos sinais de saída medidos, isto implica que todos os dados amostrados serão utilizados. Neste trabalho por razões estatísticas será sempre assumido que $j, s \rightarrow \infty$.

Os subscritos de $Y_{0|2i-1}$, $Y_{0|i-1}$, $Y_{0|i}$ denotam o subscrito do primeiro e último elemento da primeira coluna da matriz de Hankel. O subscrito “ p ” denota passado e “ f ” futuro. As matrizes Y_p (entradas passadas) e Y_f (entradas futuras) são definidas dividindo-se a matriz $Y_{0|2i-1}$ em duas partes iguais de i blocos de linhas. As matrizes Y_p^+ e Y_f^- por outro lado são definidas mudando-se a borda entre as regiões de passado e futuro um bloco de linhas para baixo. (O subscrito “ $+$ ” denota a adição de um bloco de linha enquanto o subscrito “ $-$ ” denota a retirada de um bloco de linha), Equação (40).

$$\left(\frac{Y_{0|i}}{Y_{i+1|2i-1}} \right) \stackrel{def}{=} Y_{0|2i-1} \stackrel{def}{=} \frac{\overbrace{\begin{pmatrix} y_0 & y_1 & \cdots & y_{j-1} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ y_{i-2} & y_{i-1} & \cdots & y_{i+j-3} \\ y_{i-1} & y_i & \cdots & y_{i+j-2} \\ y_i & y_{i+1} & \cdots & y_{i+j-1} \end{pmatrix}}^{j}}{\underbrace{\begin{pmatrix} y_{i+1} & y_{i+2} & \cdots & y_{i+j} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ y_{2i-1} & y_{2i} & \cdots & y_{2i+j-2} \end{pmatrix}}^{i-1}} \stackrel{def}{=} \left(\frac{Y_p^+}{Y_f^-} \right) \quad (40)$$

Embora a distinção entre passado e futuro possa parecer sem sentido, esta notação é usual em um contexto intuitivo, pois os termos passado e futuro se referem aos instantes de tempo em que as respostas foram obtidas, ou seja, o conjunto de todas as respostas futuras foi obtido em instantes de tempo posteriores àqueles que foram obtidas as respostas passadas. Note também que as saídas passadas e futuras têm muitos elementos em comum, por exemplo, y_i pode ser encontrado tanto em Y_p como em Y_p^+ . Entretanto as colunas de Y_p e Y_p^+ não têm elementos em comum, desta maneira é feita a distinção entre passado e futuro.

A matriz de observabilidade Γ_i (onde i indica o número de blocos de linhas) é definida como, Equação (41):

$$\Gamma_i \stackrel{def}{=} \begin{pmatrix} C \\ CA \\ CA^2 \\ \vdots \\ CA^{i-1} \end{pmatrix} \in \mathbb{R}^{li \times n} \quad (41)$$

Assumindo-se que o par $\{A, C\}$ é observável, isso implica que o posto de Γ_i é igual a n . Tomando como base o teorema principal da Identificação Estocástica (IE) é possível estimar as matrizes do modelo.

6.1.1.1 Teorema Principal da Identificação Estocástica

O teorema principal da IE permite computar o espaço das linhas da sequência de estado $\hat{X}_i$ e o espaço de colunas da matriz de observabilidade estendida Γ_i diretamente dos dados de saída, sem qualquer conhecimento prévio do sistema de matrizes A e C e as matrizes do sistema então podem ser estimadas a partir de $\hat{X}_i$ ou Γ_i , utilizando as matrizes de ponderação W_1 e W_2 . As matrizes de ponderação W_1 e W_2 determinam a base do espaço de estado na qual o modelo será identificado (Componentes Principais – PC, Componentes Principais não Ponderada – UPC e Análise Canônica Variada - CVA). Para a formulação detalhada ver (VAN OVERSCHEE; DE MOOR, 1996).

Os principais aspectos do teorema principal da IE, conforme discutido em (FREITAS, 2008), são apresentados a seguir. Para isso, as seguintes considerações são necessárias:

O ruído de processo w_k e o ruído de medida v_k não são nulos;

O número de pontos utilizados na medição dos sinais de saída tende ao infinito ($j \rightarrow \infty$);

As matrizes de ponderação $W_1 \in \mathbb{R}^{l \times l}$ e $W_2 \in \mathbb{R}^{l \times l}$ são tais que W_1 tem posto completo e W_2 obedece à igualdade: $\text{posto}(Y_p) = \text{posto}(Y_p, W_2)$;

O espaço das saídas futuras, conforme é discutido em VAN OVERSCHEE e DE MOOR, é projetado no espaço das saídas passadas, através da projeção ortogonal O_i , Equação (42);

$$O_i \stackrel{\text{def}}{=} \frac{Y_f}{Y_p} \quad (42)$$

A projeção ortogonal O_i ponderada pelas matrizes W_1 e W_2 é decomposta em valores singulares, Equação (43).

$$W_1 O_i W_2 = (U_1 \ U_2) \begin{pmatrix} S_1 & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} V_1^T \\ V_2^T \end{pmatrix} = U_1 S_1 V_1^T \quad (43)$$

A projeção ortogonal O_i é igual ao produto da matriz de observabilidade estendida e da sequência de estado do filtro de Kalman, dado pela Equação (44).

$$O_i = \Gamma_i \hat{X}_i \quad (44)$$

A ordem do sistema é igual ao número de valores singulares S_l na Equação (43) diferentes de zero.

A matriz de observabilidade estendida Γ_i e a matriz de controlabilidade estendida Δ_i^c são dadas pelas Equações (45) e (46), respectivamente.

$$\Gamma_i = W_1^{-1} U_1 S_1^2 T \quad (45)$$

$$\Delta_i^c = \Gamma_i^\dagger \phi[Y_f, Y_p] \quad (46)$$

Onde $\phi[Y_f, Y_p]$ é a matriz de covariância entre Y_f e Y_p .

A parte da sequência de estado $\hat{X}_i$ que se encontra no espaço das colunas de W_2 pode ser obtido da Equação (47):

$$\hat{X}_i W_2 = T^{-1} S_1^2 V_1^{-1} \quad (47)$$

A sequência de estado $\hat{X}_i$ é dada por:

$$\hat{X}_i = \Gamma_i^\dagger O_i \quad (48)$$

O sistema de matrizes A_d e C_d pode ser obtido a partir de um algoritmo que utiliza a sequência de estados $\hat{X}_i$ e a matriz de observabilidade Γ_i , que por sua vez, podem ser obtidos através do teorema principal da IES, Equações (45) e (48).

De maneira similar ao raciocínio apresentado no teorema principal, pode-se obter uma nova projeção dando um deslocamento Δt nas respostas passadas e futuras, Equações (49) e (50).

$$O_{i-1} = \frac{Y_f^-}{Y_p^+} \quad (49)$$

$$\mathbf{O}_{i-1} = \Gamma_{i-1} \hat{X}_{i+1} \quad (50)$$

$\mathbf{O}_i$ pode ser calculado a partir dos dados de saída, onde Γ_{-i} denota a matriz Γ_i sem as últimas l linhas e pode ser calculado segundo a Equação (52).

$$\Gamma_{i-1} = \Gamma_{-i} \quad (51)$$

$$\hat{X}_{i+1} = \Gamma_{i-1}^\dagger \mathbf{O}_{i-1} \quad (52)$$

Assim, $\hat{X}_i$ e $\hat{X}_{i+1}$ são calculados usando apenas os dados de saída do modelo. Rearranjando as equações é possível formar o seguinte conjunto de equações lineares:

$$\begin{pmatrix} \hat{X}_{i+1} \\ Y_{i|i} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} A_d \\ C_d \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \hat{X}_i \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} p_w \\ p_v \end{pmatrix} \quad (53)$$

onde: $Y_{i|i}$ é a matriz de bloco de Hankel com apenas um bloco de linhas. Este conjunto de equações pode ser resolvido para A e C . Considerando que os resíduos do filtro de Kalman são não correlacionados com $\hat{X}_i$, pode-se resolver o conjunto de equações pelo método dos mínimos quadrados obtendo as matrizes do modelo, Equação (54).

$$\begin{pmatrix} A_d \\ C_d \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \hat{X}_{i+1} \\ Y_{i|i} \end{pmatrix} \hat{X}_i^\dagger \quad (54)$$

Uma vez estimada a matriz dinâmica A_d , são calculados os autovalores/autovetores desta matriz na sua forma discreta e posteriormente os mesmos são associados ao sistema contínuo visando obter as frequências e modos do modelo. Neste caso, é feita a decomposição da matriz A (sistema contínuo) em autovalores e autovetores, Equação (55).

$$A = \Psi \Lambda \Psi^{-1} \quad (55)$$

Onde Ψ é uma matriz complexa cujas colunas são os autovetores do sistema discreto e Λ é uma matriz complexa diagonal que contém os autovalores do sistema discreto $(\lambda_1 \ \lambda_1 \ \dots \ \lambda_n)$.

Os autovalores discretos são relacionados com os autovalores (μ_i) da matriz de estado contínua A pela expressão (56).

$$\mu_i = \frac{1}{\Delta t} \ln(\lambda_i) \quad (56)$$

Δt é o intervalo de discretização. Os autovalores de A são pares de valores complexos conjugados utilizados para obter os parâmetros do modelo. A razão de amortecimento modal ζ_i e a frequência natural ω_i da estrutura são obtidas a partir dos autovalores contínuos, Equação (57).

$$\mu_i, \bar{\mu}_i = -\zeta_i \omega_i \pm j \omega_i \sqrt{1 - \zeta_i^2} \quad (57)$$

Onde $j^2 = -1$. Os autovetores do sistema (colunas de Ψ) são os mesmos tanto para a discreta como para a representação de espaço de estado contínua. Neste caso, os modos de vibrar (ϕ) são dados pela parte observável dos autovetores do sistema, obtidos utilizando a equação de observação, Equação (58).

$$\phi = C\Psi \quad (58)$$

Identificadas as matrizes do sistema A e C , os parâmetros modais do sistema ω_i, ζ_i e ϕ_i são obtidos a partir de matrizes estimadas no *software* implementado, a identificação e separação dos modos computacionais dos modos físicos do sistema é feita de forma interativa pelo usuário, utilizando o conceito de diagrama de estabilização (VAN DER AUWERAER; PEETERS, 2004).

6.2 Medidas de deslocamento do prédio

O aparato experimental utilizado para a medida de deslocamento do prédio nos vários pontos de interesse foi o mesmo apresentado e discutido na seção 5.3. Entretanto, neste caso, o interesse maior foi voltado para a medição e obtenção do deslocamento de um conjunto de pontos simultaneamente, para isso, inicialmente, foi definida uma malha de medição. A malha de medição contém 25 pontos de medida convenientemente distribuídos ao longo da estrutura

para captar as principais características do comportamento da estrutura e permitir obter os modos de vibrar da mesma. Para especificação dos pontos de medida, cada coluna do prédio recebeu 6 etiquetas na parte de trás e 6 etiquetas na parte da frente, além de uma etiqueta que foi fixada na base do prédio, próximo ao ponto onde o atuador (motor) movimenta a estrutura. A Figura 55 mostra o *Set Up* experimental utilizado, a estrutura com as respectivas etiquetas referentes a cada ponto de medição, o computador e sistema de controle do prédio e a câmera com o respectivo sistema de fixação.

Figura 55 – Sistema de medição com marcação para realização da análise modal



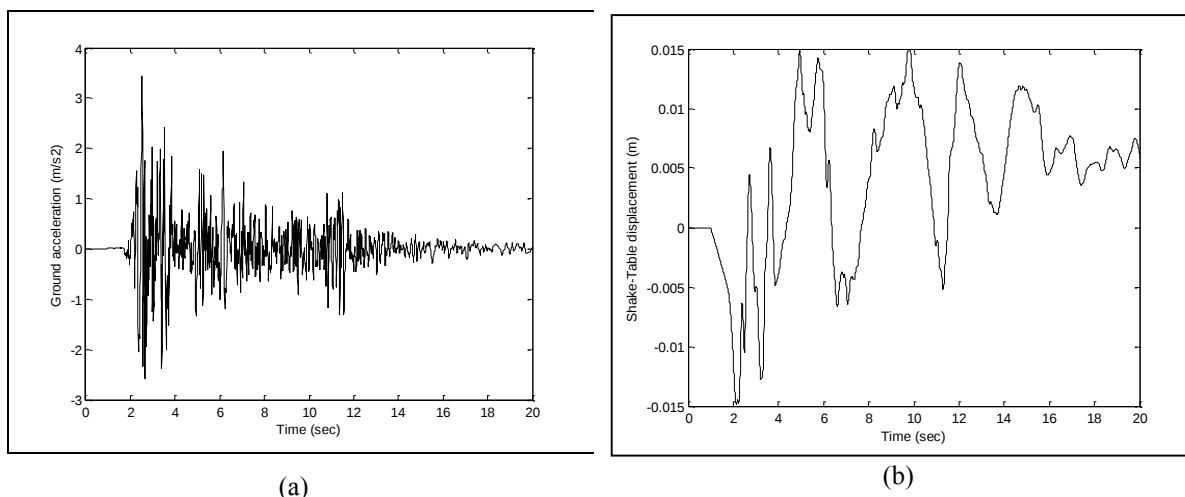
Fonte: Elaborado pelo autor.

As etiquetas foram colocadas na estrutura, objetivando facilitar a definição dos pontos na imagem e consequentemente, o processamento e obtenção dos deslocamentos da estrutura nos respectivos pontos de medição.

Uma vez definida a montagem do *Set Up* experimental o sistema foi calibrado e definido os parâmetros da câmera, distâncias da imagem ao objeto, fixação da câmera e, finalmente, passou-se aos testes preliminares. A estrutura foi excitada com uma excitação do tipo sísmica, aplicada na base da estrutura (motor de controle). O sinal utilizado foi uma réplica do sinal do terremoto El Centro que ocorreu em 1940 no Vale Imperial, no sudeste da Califórnia do Sul (FILIATRAULT, 2002), mostrado na Figura 56a. O sistema de controle da estrutura (Shake table) utiliza um controlador proporcional-derivativo (PD) para controlar a posição do motor com base no sinal de referência (ABREU; LOPES JUNIOR, 2010). Neste caso, o controlador do motor da estrutura (Shake table) trabalha com base no deslocamento do sistema, portanto, o

signal de aceleração foi integrado duas vezes para obtenção do sinal de controle do motor (deslocamento), Figura 56b.

Figura 56 – Réplica do sinal do terremoto El Centro usado como excitação sísmica - (a) e sinal deslocamento obtido com a integração do sinal de aceleração e usado como referência para o motor no controlador PD – (b).



Fonte: Abreu e Lopes Junior (2010)

Para a aquisição do vídeo, os parâmetros da câmera foram ajustados de acordo com as condições do teste. A câmera foi configurada para uma taxa de aquisição de 120 quadros por segundo, o que corresponde a uma frequência de aquisição de 120 Hz e resolução de 640×480 pixels. A câmera foi inicialmente acionada para depois ser acionado o sistema de vibração do prédio, conseqüentemente, foi necessário, a partir do processamento do vídeo, uma redefinição do início do sinal coincidindo com o momento da excitação.

6.2.1 Processamento do vídeo e obtenção dos deslocamentos

Uma vez feita a aquisição do movimento da estrutura (vídeo) excitada com o sinal sísmico em escala reduzida, conforme discutido acima, o vídeo foi processado buscando estimar o deslocamento dos vários pontos de interesse da estrutura.

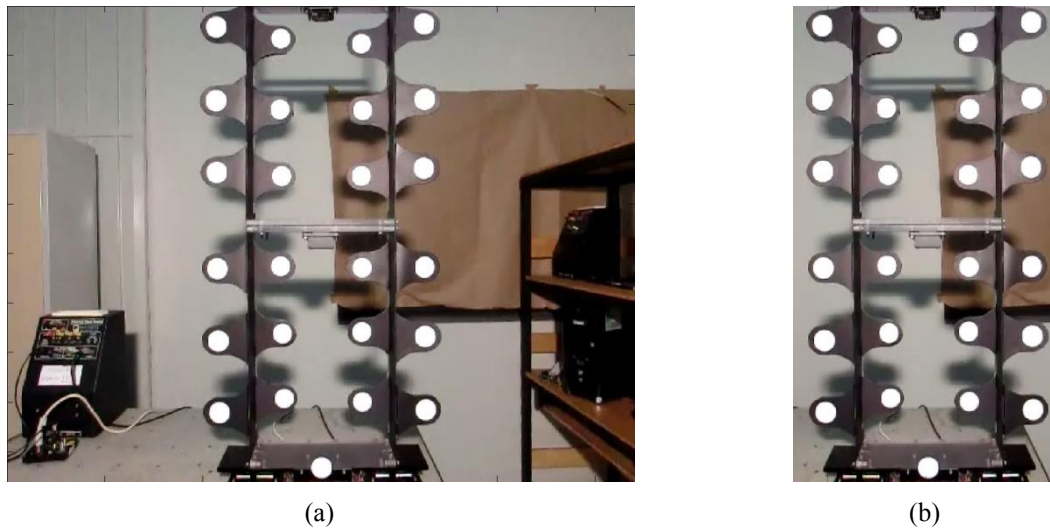
No processamento das imagens foram utilizadas, sequencialmente, as seguintes ferramentas:

- Corte - A imagem foi cortada em uma região de interesse com o propósito de reduzir os alvos não desejados que poderiam aparecer na cena e conseqüentemente, dificultar a identificação dos objetos alvos. Isso permitiu minimizar o tempo de processamento;

- Limiarização (*thresholding*) – O limiar de corte (*threshold*) (GONZALES; WOODS, 2002), foi utilizado para separar os alvos (adesivos nas colunas da estrutura) do restante da cena;
- Erosão – Foi utilizada para a remoção de pequenos objetos e retirada de algumas camadas de pixels das bordas de objetos maiores (GONZALES; WOODS, 2002), possibilitando uma melhor definição dos alvos de interesse;
- Dilatação – Foi utilizada para Aumentar as camadas de pixels nas bordas dos objetos (GONZALES; WOODS, 2002), ou seja, dos alvos previamente identificados;
- Obtenção dos centroides – O cálculo do centroide dos alvos foi feito para obtenção das suas correspondentes posições na imagem em termos de pixels.

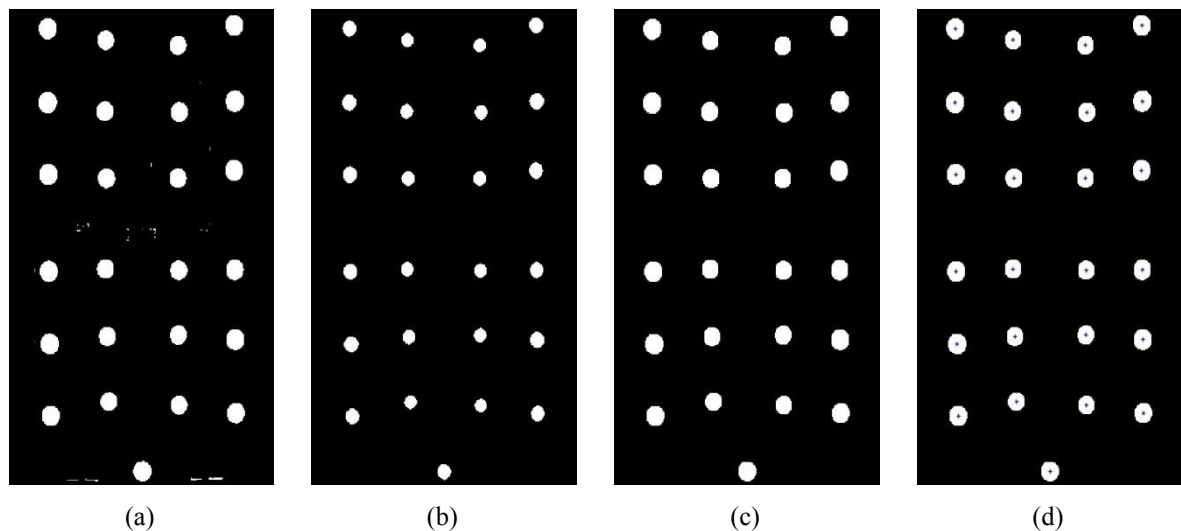
As figuras 57 e 58 ilustram a sequência de uso das ferramentas de processamento de imagem utilizadas e os correspondentes efeitos obtidos, ressaltando que o vídeo foi processado quadro a quadro e a sequência mostrada refere-se a um quadro. Na Figura 57a é apresentado um quadro original do vídeo sem qualquer modificação, posteriormente, este quadro foi cortado para minimizar os alvos indesejados na cena, isto reduz o tempo de processamento, visto que só a região de interesse é analisada, Figura 57b. Já na figura 58a é mostrada a aplicação da limiarização, onde as cores são separadas em preto/branco, ou seja, as cores mais claras tornam-se brancas e as escuras tornam-se pretas de acordo com o limiar aplicado pelo usuário, separando os alvos do restante da cena. Neste caso, alguns alvos indesejados ainda permaneceram na cena, a limiarização não consegue separar apenas o alvos de interesse, restando alguns alvos não desejados, logo, foi necessário utilizar outras ferramentas para evidenciar apenas os alvos de interesse. A ferramenta de erosão foi utilizada na imagem limiarizada, eliminando algumas camadas das bordas dos objetos na imagem Figura 58b. Ressalta-se que, caso o nível de remoção selecionado pelo usuário seja maior do que o tamanho do objeto na imagem, o objeto será eliminado, ou seja, neste caso permaneceram apenas os objetos de interesse. Uma vez que os alvos tiveram suas bordas alteradas pelo uso da ferramenta de erosão, as posições dos centroides dos mesmos podem ser alteradas. Desta forma, buscando minimizar este efeito, foi utilizada a ferramenta de dilatação que “de certa forma” adiciona novamente as camadas de pixels retiradas dos alvos no processo da erosão, Figura 58.c. Tendo os alvos separados e evidenciados na cena, são calculadas as posições dos centroides de cada alvo, Figura 58d.

Figura 57 – (a) Imagem original e (b) imagem cortada na região de interesse.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 58 - *Threshold* - (a), Erosão - (b), Dilatação - (c) e cálculo dos centroides - (d)



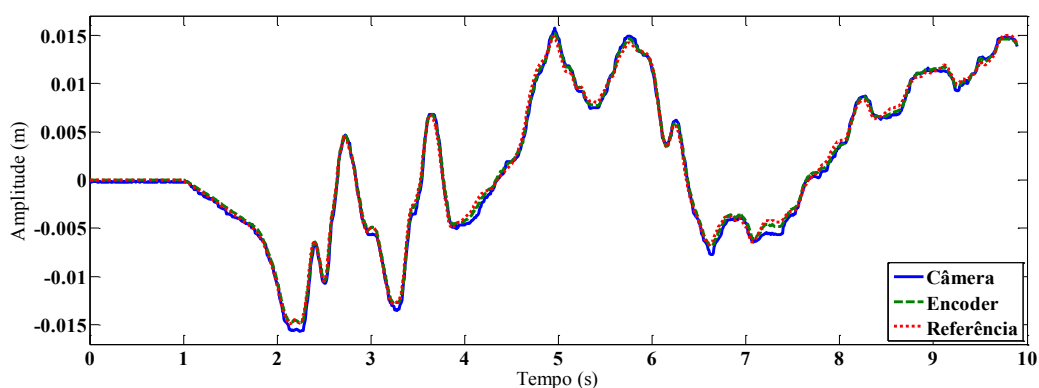
Fonte: Elaborado pelo autor

Durante a obtenção das posições dos centroides de cada alvo (quadro a quadro), o algoritmo de rastreamento foi utilizado de modo a ordenar estas posições de acordo com o deslocamento correspondente de cada alvo no quadro atual com relação ao quadro anterior, relacionando-os e ordenando o deslocamento sofrido por cada alvo. Isto permite obter, em termos da variação da posição dos pixels, o deslocamento de cada alvo a partir da sua variação de posição em cada quadro do vídeo. Utilizando as relações descritas na seção 3.2 e conhecendo o valor da relação unidade de deslocamento por número de pixels, os deslocamentos dos alvos foram obtidos na correspondente unidade de medida.

6.2.2 Avaliação e caracterização da qualidade do sinal medido

A avaliação da qualidade das medidas foi feita inicialmente com a comparação do sinal medido no ponto posicionado no centro da base do prédio com os sinais de controle do sistema de vibração gerado no Matlab e com o sinal medido pelo encoder que fornece a posição da base do prédio a cada instante. Esse ponto de medição foi escolhido porque coincide com a posição do atuador (motor) que movimenta a estrutura. Na Figura 59 é apresentada uma sobreposição do sinal de referência gerado pelo controlador (terremoto), sinal medido pelo encoder e sinal medido pela câmera. Na Tabela 11 é apresentada uma comparação quantitativa dos sinais.

Figura 59 - Comparação entre os sinais da excitação sísmica



Fonte: Elaborado pelo autor

Tabela 11 - Valores RMS do sinal de referência e dos sinais medidos com o encoder e com a câmera.

	RMS
Referência	0,0025
Encoder	0,0026
Câmera	0,0027

Fonte: Elaborado pelo autor

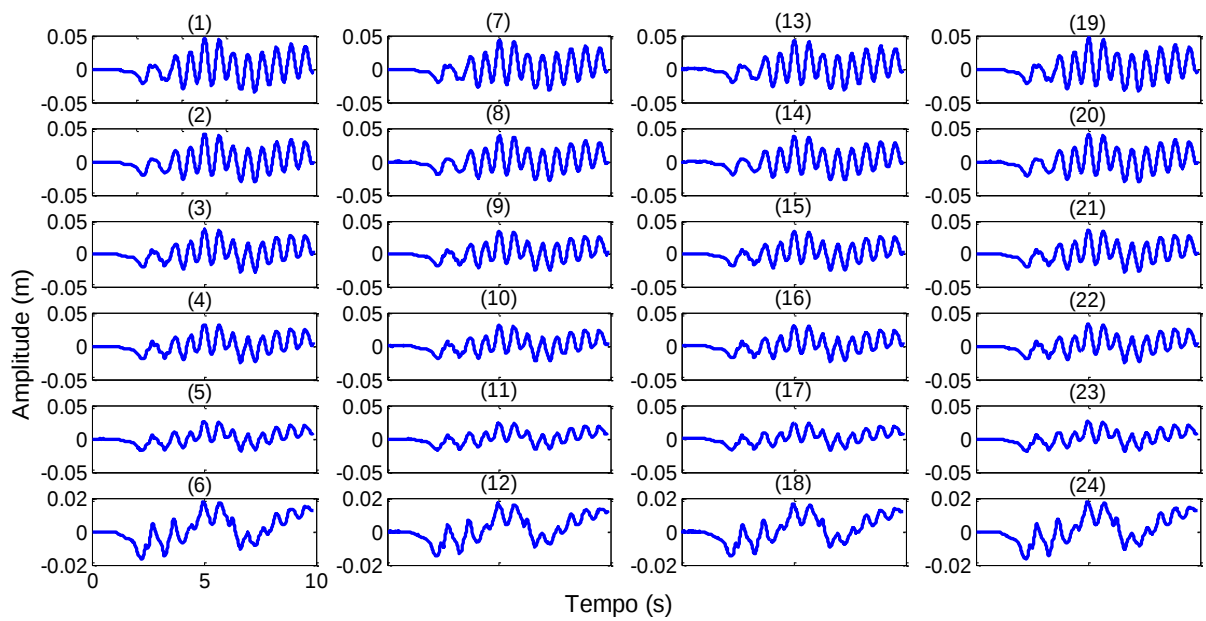
Uma vez observada qualitativa e quantitativamente a representação do sinal medido com a câmera no ponto de referência, passou-se para a medição do movimento de toda a estrutura, ou seja, do conjunto de pontos de interesse. Na Figura 60 é ilustrada a estrutura com a sequência dos números dos pontos de medição ou alvos (adesivos) e na Figura 61 são mostrados os respectivos sinais de deslocamentos de cada ponto.

Figura 60 - Pontos nomeando os adesivos.



Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 61 - Todos sinais medidos simultaneamente no prédio.



Fonte: Elaborado pelo autor

Os sinais correspondem aos valores da medição das respostas da estrutura nos respectivos pontos de interesse devido a uma excitação do tipo sísmica aplicada na base do

prédio. Os correspondentes dados medidos foram inicialmente processados e analisados e finalmente utilizados para análise modal da estrutura.

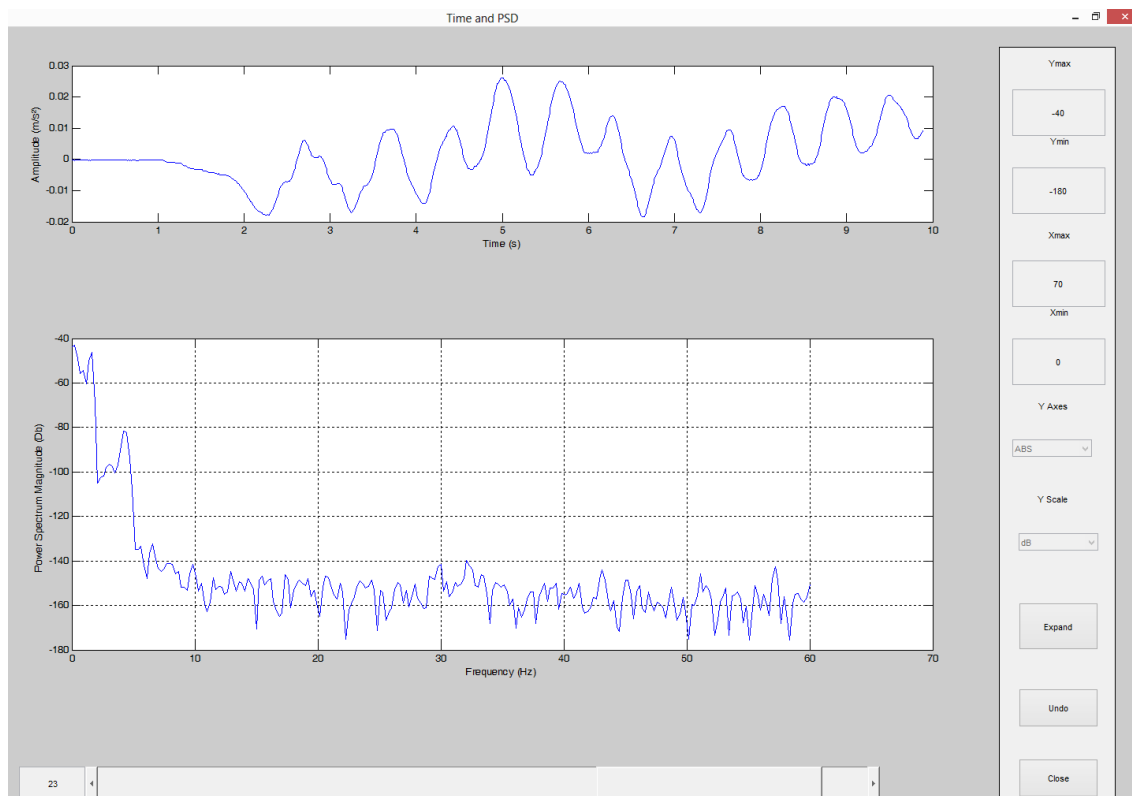
6.3 Análise modal do prédio em escala reduzida com base apenas na resposta

A extração e análise dos parâmetros modais da estrutura foi feita utilizando o *software* OEMA. Os dados de entrada (sinal de excitação), bem como o sinal do encoder não foram utilizados na análise. A identificação dos parâmetros modais da estrutura foi feita utilizando apenas as respostas do modelo. O método utilizado na identificação dos parâmetros foi o método da IES implementado no *software* OEMA.

O programa OEMA contém várias interfaces gráficas que possibilitam desde a visualização prévia dos sinais medidos (tanto no domínio do tempo quanto no domínio da frequência) como à utilização de várias ferramentas de processamento e tratamento de sinais (janelamento, filtro, decimação e outros) que auxiliam o usuário na obtenção de sinais mais adequados capaz de evidenciar de forma melhor as características e parâmetros de interesse.

Na Figura 62 é mostrado o sinal de resposta da estrutura medido no ponto 23 e o seu respectivo espectro, escala em dB.

Figura 62 - Sinal no tempo e sua respectiva densidade espectral medidos no ponto 23 da estrutura.



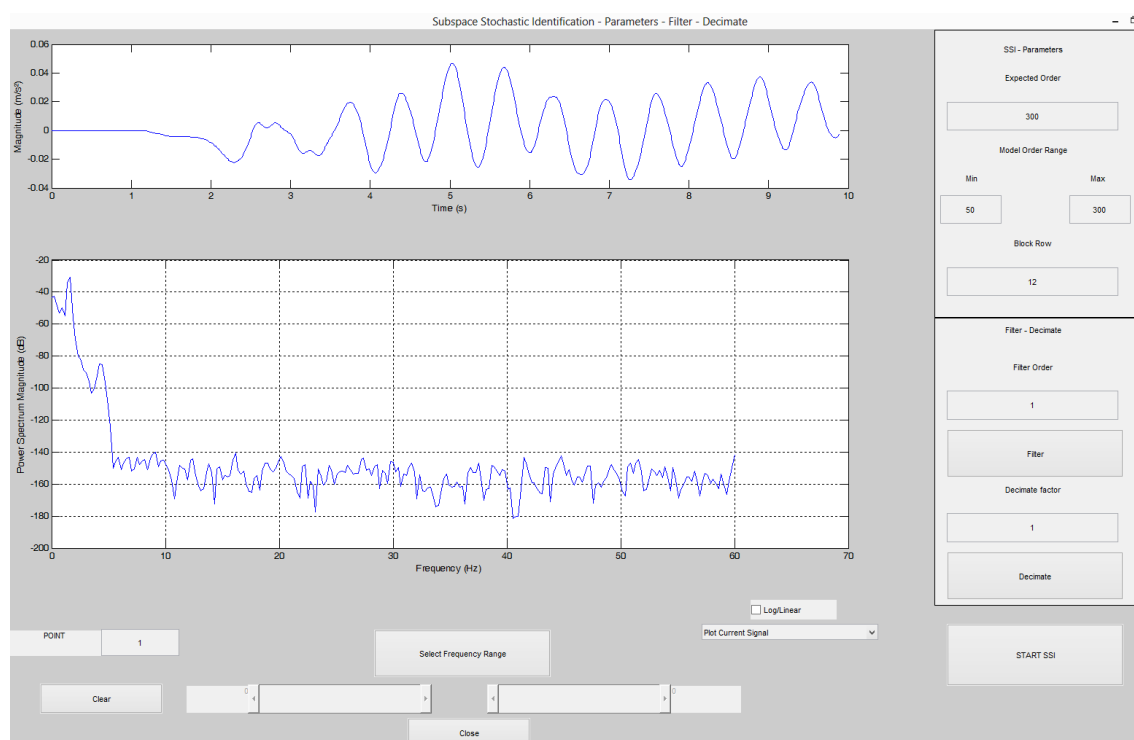
Fonte: Elaborado pelo autor

Uma análise do espectro mostra dois principais picos de ressonância, e é possível observar que a resposta a partir do segundo pico apresenta um nível de energia muito baixo. Isso ocorre, em função do sinal de excitação utilizado (sísmico) apresentar energia apenas nas frequências mais baixas da ordem de até 10 Hz. Na escala *log*, para alguns pontos de medição é possível observar a existência de um terceiro pico de ressonância acima de 30 Hz. Na escala linear o terceiro pico de frequência não é evidenciado e é possível observar apenas os dois primeiros picos de ressonância.

6.3.1 Identificação dos parâmetros do modelo

O programa usado obedece a uma sistemática modular, com interfaces gráficas, contendo diversas ferramentas de auxílio ao usuário, que permitem selecionar a faixa de frequências de interesse, filtrar e decimar o sinal e outros. Permite ainda, fixar a ordem máxima e mínima do modelo, entre outros. Na Figura 63 é apresentada esta interface.

Figura 63 - Interface gráfica de parâmetros de entrada utilizados na IES.

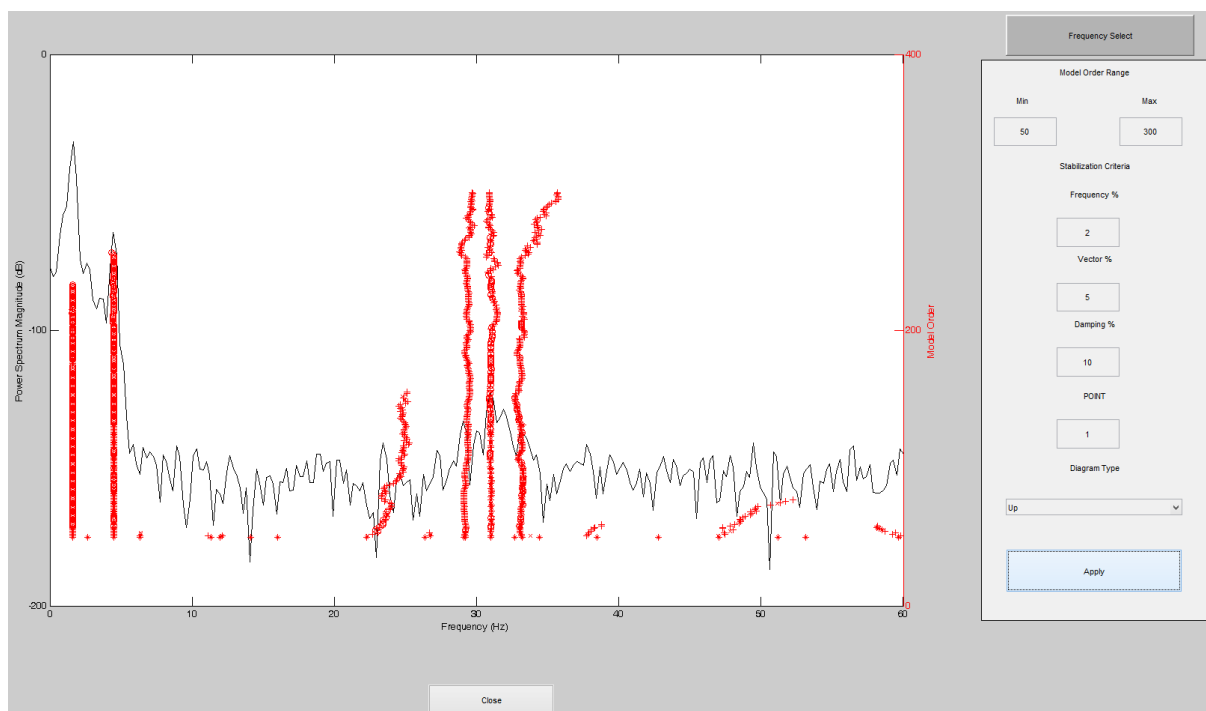


Fonte: Elaborado pelo autor

Definidos os principais parâmetros de entrada do algoritmo, inicia-se o processo de identificação dos parâmetros modais propriamente dito. A avaliação dos parâmetros e definição

da ordem do modelo é feita com base no diagrama de estabilização do sistema. A Figura 64 mostra a interface gráfica que apresenta o diagrama de estabilização para a faixa de frequência analisada.

Figura 64 – Diagrama de estabilização.



Fonte: Elaborado pelo autor

É possível encontrar quatro diferentes situações no resultado do diagrama de estabilização, onde cada situação é representada por um caractere diferente, o caractere (*) representa os polos estáveis, o caractere (x) representa que somente a frequência e amortecimento são estáveis, o caractere (o) representa que somente a frequência e modo são estáveis e por fim o caractere (+) representa que somente a frequência é estável.

Na Figura 64 é mostrado que o algoritmo calculou 6 prováveis polos, no entanto, a maioria deles não são polos estáveis, sendo que a maioria apresentou o caractere (+), o qual representa estabilidade somente na frequência. Analisando o gráfico, foram selecionados 3 polos que permaneceram estáveis no decorrer do processamento. A partir da ordem 50 os polos se tornam estáveis para os primeiros picos de frequência, indicando a provável ordem do modelo e consequentemente permitindo identificar as matrizes A e C e os correspondentes parâmetros do modelo.

Uma vez feita a identificação das matrizes do modelo, os modos foram obtidos diretamente a partir das matrizes identificadas conforme discutido anteriormente. A Tabela 12

mostra as frequências e fatores de amortecimento estimados para os três primeiros modos do modelo.

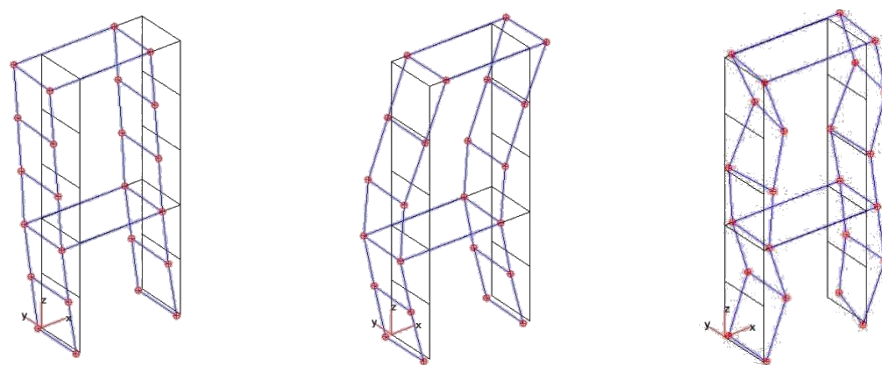
Tabela 12 - frequências naturais e fatores de amortecimento da estrutura.

Modos	ω (Hz)	ξ (Fator de amortecimento)
1	1,7	0,033
2	4,5	0,018
3	33,3	0,007

Fonte: Elaborado pelo autor.

O *software* apresenta ainda uma interface gráfica que permite a definição do modelo geométrico da estrutura e a correspondente malha dos pontos de medida. Isso permite observar e analisar a forma dos modos de vibrar da estrutura. Na Figura 65 são apresentados os três primeiros modos de vibrar da estrutura analisada.

Figura 65 - Modos extraídos da estrutura do prédio em escala reduzida



Fonte: Elaborado pelo autor.

A utilização da câmera para medidas de deslocamento se mostrou adequada para este tipo de estrutura. Os deslocamentos medidos foram usados para identificação dos parâmetros modais do modelo, utilizando a técnica de IES.

Uma análise dos modos e valores obtidos mostra que os resultados obtidos foram consistentes, a comparação do sinal medido com o sinal de referência no ponto de excitação permite afirmar que a técnica é suficientemente acurada para este tipo de estrutura.

7 CONCLUSÕES

Neste trabalho é discutido o desenvolvimento e a implementação de uma metodologia de medidas de deslocamento utilizando uma única câmera digital, cujo foco principal é a medida de movimento e vibrações de estruturas. Os conceitos e o embasamento teórico são apresentados, envolvendo uma discussão de como se dá a formação e obtenção de imagens digitais, a definição e obtenção dos parâmetros intrínsecos das câmeras, bem como o algoritmo e as técnicas de processamento de imagens utilizadas. A obtenção dos deslocamentos dos pontos alvos é feita a partir da utilização de várias ferramentas de análise e processamento de imagens, dentre elas, separação de cores, detecção de bordas, *thresholding*, erosão, dilatação, juntamente com o cálculo do centroide dos alvos e o rastreamento dos movimentos dos mesmos. O rastreamento (*tracking*) da posição dos alvos, é feito para uma sequência de imagens do movimento dos alvos em termos de pixels e posteriormente convertido em unidades de deslocamento com base no posicionamento e parâmetros da câmera. Esses parâmetros são obtidos através de um processo de calibração.

O uso de ferramentas de segmentação de imagens se mostrou bastante efetivo para obter as características geométricas e as coordenadas dos alvos, entretanto sua precisão está limitada a resolução do sensor da câmera.

Os melhores resultados, tanto para a estimativa da distância do objeto quanto para a obtenção da relação unidade de medida/pixel, ocorre quando o movimento de aproximação/afastamento da câmera na direção do objeto é feito da posição h_2 para h_1 . Isso mostra que a precisão do sistema depende fortemente da capacidade do sensor da câmera definir bem o alvo na cena e da área de pixels ocupada pelo alvo.

A avaliação da metodologia foi feita a partir de três testes experimentais distintos, num primeiro teste foi avaliada como melhor estimar a distância de um alvo da câmera, posteriormente foi feito um teste utilizando um micrômetro de precisão para validar a metodologia e avaliar a precisão da mesma e finalmente, foi realizada uma aplicação da metodologia para medidas de vibração de um prédio em escala reduzida, mais especificamente, a análise modal com base apenas na resposta.

Os resultados mostraram que a metodologia pode ser utilizada para medidas estáticas, dinâmicas e os erros de medição estimados foram da mesma ordem dos erros discutidos na literatura para as técnicas de medições similares.

A proposta, por ser uma técnica de medição de não-contato pode ser aplicada facilmente para medição de vibração de estruturas muito pequenas, visto que, na maioria dos casos, o

contato com o sensor pode influenciar o comportamento do sistema. Outro aspecto importante a ser ressaltado é a possibilidade da sua aplicação para medições envolvendo materiais de diferentes composições (metálicos ou não) que é uma limitação dos sensores capacitivos. A medição em estruturas de difícil acesso, energizadas ou em altas temperaturas também poderiam ser feitas. Em comparação com a maioria dos sensores convencionais do tipo proximetro, LVDT etc, a técnica utilizando a câmera oferece uma ampla faixa de medição que pode variar de décimos de milímetros até metros com a possibilidade de obtenção de medidas para vários pontos simultâneos.

Os principais aspectos que poderiam ser abordados como desvantagem ou limitações da técnica estão relacionados com a necessidade de uma boa iluminação ressaltando as cores dos alvos de interesse e o custo elevado das câmeras de alta resolução e velocidade (no caso de medições em altas frequências e pequenas amplitudes). A utilização da técnica no ambiente escuro não é possível, a menos que seja utilizada uma câmera específica com visão noturna.

Com base nos resultados e análises realizadas, a metodologia implementada com base na utilização de uma única câmera se mostrou como uma proposta com alto potencial de aplicação como ferramenta de medição de não-contato, relativamente simples e efetiva. Isso abre uma vasta gama de aplicações para a proposta, visto que, em comparação com as propostas de medições de deslocamento com câmeras vista no mercado, a mesma é uma metodologia mais simples e relativamente barata.

7.1 Sugestões para trabalhos futuros

Entende-se que o desdobramento deste trabalho abre uma vasta gama de possibilidades de melhorias e aplicações da técnica, das quais seguem algumas:

- Método de medição em superfícies oblíquas - Para as situações em que é difícil posicionar a câmera perpendicularmente ao alvo, as imagens seriam capturadas em ângulos e posteriormente a correção das mesmas seria feita a partir de novas relações trigonométricas levando em consideração a angulação da câmera;
- Discutir a possibilidade de utilização apenas da variação da distância focal - Substituir o passo de calibração pela variação da distância focal (aplicação de *zoom*);
- Utilização de duas câmeras de forma sincronizada - A utilização de duas câmeras sincronizadas e posicionadas perpendicularmente entre si poderia ser utilizada visando estimar os deslocamentos de um dado ponto em três dimensões.

REFERÊNCIAS

- ABREU, G. L. C. M.; LOPES JUNIOR, V. L. H₂ Optimal control for earthquake excited structures. In: NATIONAL CONGRESS OF MECHANICAL ENGINEERING – CONEM2010, 6., 2010, Campina Grande. **Proceedings...** Campina Grande: [s. n.], 2010.
- ADOLF, S.; THESING, J. Full Surface 3-D measurements facilitate pattern making and provide numerous benefits to foundries. In: CASTING PLANT AND TECHNOLOGY INTERNATIONAL, 3., 2011, [S. l.]. **Proceedings...** [S. l.: s. n.], 2011. p 42-46.
- APTINA IMAGE CORPORATION. **An objective look at FSI and BSI**. [S. l.], 2010.
- AUGUSTEIJN, M. F.; CLEMENS, L. E. A neural-network approach to the detection of texture boundaries. **Engineering Applications of Artificial Intelligence**, Kidlington, v. 9, n. 1, p 75-81, 1996.
- BOCKAERT, V. **Sensor sizes**. [S. l.: s. n.], 2013. Disponível em: <<http://www.dpreview.com/glossary/câmera-system/sensor-sizes>>. Acesso em: 3 jul. 2013
- BOUGUET, J. Y. **Programa de calibração de câmeras**. [S. l.: s. n.], 2013. Disponível em: <http://www.vision.caltech.edu/bouguetj/calib_doc/index.html#ref>. Acesso em: 25 set. 2013.
- BRINCKER, R.; ANDERSEN, P. Understanding stochastic subspace identification. In: INTERNATIONAL MODAL ANALYSIS CONFERENCE (IMAC), 24., 2006, St Louis. **Proceedings...** St Louis: [s. n.], 2006.
- CAMARGO, E.; JACOBSEN, N.; STRAFACCI, D. Operational modal analysis on a modified helicopter. In: CONFERENCE PROCEEDINGS OF THE SOCIETY FOR EXPERIMENTAL MECHANICS SERIES, 2011, [S. l.]. **Proceedings...** [S. l.: s. n.], 2011. v. 1.1, p 265-273, 2011.
- CANO-GARCIA, A.; LAZARO, J. L.; FERNAINDEZ, P. R. Simplified method for radiometric calibration of an array camera. In: PROCEEDINGS OF THE IEEE INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON INTELLIGENT SIGNAL PROCESSING, 2007, [S. l.]. **Proceedings...** [S. l.: s. n.], 2007. p. 1-5.
- CARVALHO, A.; SILVA, R.; REBELLO, J.; VIANA, A. O mundo das imagens digitais, **Revista Matéria**, Rio de Janeiro, v. 8, n. 2, p. 167-186, 2003.
- CARULLO, A.; PARVIS, M. An ultrasonic sensor for distance measurement in automotive applications. **IEEE Sensors Journal**, Piscataway, v. 1. n. 2, p. 143-147, 2001.
- CHENG, H. D.; XU, H. X. A novel fuzzy logic approach to contrast enhancement Pattern Recognition. **Journal of the pattern recognition society**, San Diego, v. 33, p. 809-819, 2000.
- CLARKSON, B.L.; MERCER, C.A. Use of cross-correlation in studying the response of lightly damped structures to random forces. **AIAA Journal**, Reston, v. 3, n. 12, p. 2287-2291, 1965.
- EGAMI, T.; OE, S.; TERADA, K.; KASHIWAGI, T. Three dimensional measurement using color image and movable CCD system. In: ANNUAL CONFERENCE OF THE IEEE

INDUSTRIAL ELECTRONIC SOCIETY, 27., [S. l.]. **Proceedings...** [S. l.]: IEEE, 2001. p. 1932–1936.

EWINS, D. J. **Modal testing: theory and practice**. New York: John Wiley & Sons Inc, 1984.

FACON, J. **Morfologia Matemática: teoria e exemplos**. Curitiba: [s. n], 1996.

FILHO, O. M.; NETO, H. V. **Processamento digital de imagens**. Rio de Janeiro: Brasport, 1999.

FILIATRAULT, A. Elements of earthquake engineering and structural dynamics. 2. ed., {S. l.]: Polytechnic International Press, 2002.

FREITAS, T. C.; PEREIRA, J. A. Modal parameters identification using only response data: stochastic subspace identification and frequency domain decomposition. In: INTERNATIONAL CONGRESS OF MECHANICAL ENGINEERING – COBEM 2007, 19., 2007, Brasília, DF. **Proceedings...** Brasília, DF: [s. n.], 2007.

GERSCH, W. Estimation of the autoregressive parameters of a mixed autoregressive moving-average time series. **IEEE Transactions on Automatic Control**, Piscataway, v. 15, n. 5, p. 583-588, 1970.

GONZALES, R. C.; WOODS, R. E. **Digital Image Processing**. [S. l.]: Prentice Hall, 2002.

HASAN, Y. N.; KARAM, L. J. Morphological reversible contour representation, **IEEE. Trans. On Pattern Analysis and Machine Intelligence**, Piscataway, v. 22, n. 3, p. 227-240, 2000.

HERMANS, L.; AUWERAER, V. D. Modal testing and analysis of structures under operational conditions: industrial applications. **Mechanical System and Signal Processes**, London, v. 13, p. 193-216, 1999.

HSU, C. C.; LU, M. C.; WANG, W. Y.; LU, Y. Y. Distance measurement based on pixel variation of CCD images. **ISA Transactions**, New York, n. 48, p. 389-395, 2009.

IBRAHIM, S. R.; MIKULCIK, E. C. A method for the direct identification of vibration parameters from the free response. **The Shock and Vibration Bulletin**, Amsterdam, v. 47, p. 183-198, 1977.

JAMES III, G. H.; CARNE, T. G.; LAUFFER, J. P. The natural excitation technique (NExT) for modal parameter extraction from operating structures. **Modal Analysis: the international journal of analytical and experimental modal analysis**, London, v. 10, n. 4, p. 260-277, 1995.

JUANG, J-N.; PAPPA, R. S. An eigensystem realization algorithm for modal parameter identification and model reduction. **Journal of Guidance**, Reston, v. 8, n. 5, p. 620-627, 1985.

JUNIOR, L. F. M. **Processamento de imagens na análise dinâmica de Risers de produção de petróleo com modelo de escala reduzida em ambiente de laboratório**. 2008. 207 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) - Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade de Campinas – UNICAMP, Campinas, 2008.

KANADE, T.; KANO, H.; KIMURAM, S. Development of a video-rate stereo machine. **Proc. IEEE/RSJ int. conf. on intelligent robots and systems**, Piscataway, v. 3, p. 95–100, 1995.

KEESE, A. **Teoria das cores**. [S. l.: s. n.], 2012. Disponível em: <http://portaldasartesgraficas.com/ficheiros/teoria_cor.pdf>. Acesso em: 8 out. 2012.

KUNG, S.Y. A new identification method and model reduction algorithm via singular value decomposition. In: ASILOMAR CONFERENCE ON CIRCUITS, SYSTEMS AND COMPUTER, ASILOMAR – CA, 12., 1978, [S. l.]. **Proceedings...** [S. l.: s. n.], 1978. p. 705-714.

LIMA, E. A. **Medida de deslocamento utilizando imagens de webcam**. 2013. 128 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista – UNESP, Ilha Solteira, 2013.

LOBÃO, F. S. **Calibração com mapeamento das distorções geométricas aplicada a um sistema de visão estéreo**. 2004. 102 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 2004.

MANSUROV, N. **What is a DSLR (Digital SLR)?**. [S. l.: s. n.], 2013. Disponível em: <<http://photographylife.com/what-is-a-dslr>>. Acesso em: 28 set. 2013.

MAIA, N. M. M.; SILVA, J. M. M. Modal analysis identification techniques. **Philosophical Transactions of The Royal Society A**, London, v. 359, p. 29-40, 2001. Doi: 10.1098/rsta.2000.0712.

MAIA, N. M. M. Fundamentals of singular value decomposition. In: INTERNATIONAL MODAL ANALYSIS CONFERENCE – IMAC., 9., Florence. **Proceedings...** Florence: [s. n.], 1991. v. 2, p. 1515-1521.

MATAIX, C.; LAZARO, J. L.; GARDEL, A.; MATEOS, R. Sensor for environment wide capture with linear response, In: Emerging technologies and factory automation. In: IEEE INTERNATIONAL CONFERENCE, 7., 1999, [S. l.]. **Proceedings...** {S. l.: s. n.}, 1999. p. 571-578.

MIWA, M.; ISHII, M.; KOIKE, Y.; SATO, M. Screen projection camera for ranging far away objects. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON PATTERN RECOGNITION, 15., [S. l.]. **Proceedings...** [S. l.: s. n.], 2000. p. 4744-4747.

MISUTA, M. S. **Rastreamento automático de trajetórias de jogadores de futebol por videogrametria: validação do método e análise dos resultados**. 2004, 200 f. Dissertação (Mestrado em Educação Física) - Faculdade de Educação Física, Universidade Estadual de Campinas, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2004.

MOTTA, J.M.S.T.; MASTER, R. S. Experimental validation Of A 3-D vision-based measurement system applied to robot calibration. **Journal of the Braz. Soc. Mechanical Sciences**, Heidelberg, v. 24, p. 234-238, 2002.

OEMA. **Operational and modal analysis software**. Ilha Solteira: Departamento de Engenharia Mecânica – Universidade Estadual Paulista - UNESP, 2008.

OPPENHEIM, A. V.; SHAFER, R. W. **Discrete-time signal processing**. Englewood Cliffs: NJ: Prentice Hall, 1989.

PAPPA, R.S.; JUANG, J-N. Same experiences with the eigensystem realization Algorithm. **Journal of Sound and Vibration**, London, v. 120, n. 1, p. 30-34, 1988.

PEETERS, B.; ROECK, G. D. Reference-based stochastic subspace identification for output-only modal analysis. **Mechanical Systems and Signal Processing**, London, v. 13, p. 855- 878, 1999.

RAO, S. S. **Vibrações mecânicas**. 4. ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2008.

RUBERT, C.; FONSECA, L. M. G.; VELHO, L. Super-resolução de imagens de sensores remotos usando a transformada de cor YUV para estimação das altas frequências. In: WORCAP, 4., 2004, São José dos Campos. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 2004.

RYOO, S. T. Segmentation based environment modeling using a single image. In: INTERNATIONAL CONFERENCE, 2004, [S. l.]. **Proceeding...** [S. l.]: ICIAR, 2004. p. 98-105, 2004.

SÄRKKÄ, S.; TAMMINEN, T.; VEHTARI, A.; LAMPINEN, J. **Probabilistic methods in multiple target tracking**. Helsinki: [s. n.], 2004.

SCIONTI, M.; LANSLOTS, J. P. Stabilization diagrams: pole identification using fuzzy clustering techniques. **Advances in Engineering Software**, London, v. 36, p. 768–779, 2005.

SHEN, D.; DAVATZIKOS, C. An adaptive-focus deformable model using statistical and geometric information. **IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence**, Piscataway, v. 22, n. 8, p. 906-912, 2000.

SONG, K. T.; TANG, W. H. Environment perception for a mobil robot using double ultrasonic sensors and a CCD camera. **IEEE Trans. on Industrial Electronics**, Piscataway, v. 43, n. 3, p. 372-379, 1996.

SPITZ, S. N.; RECHICHA, A. A. G. Accessibility analysis using computer graphics hardware. **IEEE Trans on Visualization and Computer Graphics**, Piscataway, v. 6, n. 3, p. 208-219, 2000.

SVIRDOV, S. A.; STERLYAGOV, M. S. Sea surface slope statistics measured by laser sensor. In: OCEANS ENGINEERING FOR TODAY'S TECHNOLOGY AND TOMORROW'S PRESERVATION, 94., 1994, [S. l.]. **Proceedings...** [S. l.: s. n.], 1994. p 900-905.

TANAKA, Y.; GOFUKU, A.; NAGAI, I.; MOHAMED, A. Development of a compact video-rate range finder and its application. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON ADVANCED MECHATRONICS, 3., 1998, [S. l.]. **Proceedings...** [S. l.: s. n.], 1998. p. 97–102.

TERRA, L. **Distância focal, zoom e crop: entendendo os mm da lente**. [S. l.: s. n.], 2013. Disponível em:
<<http://forum.mundofotografico.com.br/index.php?topic=2999.0>>. Acesso em: 6 fev. 2013.

TROTTA, M. **Fotografia: objetiva (lente) leica cortada ao meio**. [S. l.: s. n.], 2013. Disponível em: <http://www.marcustrotta.com/2011/05/20/fotografia-objetiva-lente-leica-cortada-ao-meio/>. Acesso em: 6 fev. 2013.

VAN OVERSCHEE, P.; DE MOOR, B. **Subspace identification for linear systems: theory, implementation, applications**. [S. l.]: Kluwer Academic Publishers, 1996.

VELVIO'S GUNDAN PHOTO SHOOTS. [S. l.: s. n.], 2013. Disponível em: <http://velvio.tistory.com/186>. Acesso em: 6 fev. 2013.

VOLD, H.; KUNDRAT, J.; ROCKLIN, T.; RUSSELL, R. A Multi-Input modal estimation algorithm for mini-computers. **SAE Paper**, Warrendale, v. 91/1, n. 820194, p. 815-821, 1982.

WALKER, J. **Fundamentos de física: óptica e física moderna**. v. 4., 8. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2009.

WANG, R. Z.; LIN, C. F.; LIN, J. C. Image hybrid by optimal LSB substitution and genetic algorithm. **Pattern Recognition**, Kidlington, v. 34, p. 671-683, 2001.

ZHANG, B.; FU, M.; YAN, H. A nonlinear neural network model of mixture of a local principal component analysis: application to handwritten digits recognition. **Pattern Recognition**, Kidlington, v. 34, p. 203-214, 2001.

ZHANG, Z. **Flexible camera calibration by viewing a plane from unknown orientations**. Redmond: Microsoft Research, 1999. Disponível em: http://www.vision.caltech.edu/bouguetj/calib_doc/papers/zhan99.pdf, Acesso em: 25 set.2013.