MARCOS TAN ENDO

**Medição de Vibrações Estruturais e de Sistemas
Rotativos Utilizando Imagens Fotográficas
Subamostradas**

São Carlos
2013

MARCOS TAN ENDO

**Medição de Vibrações Estruturais e de Sistemas
Rotativos Utilizando Imagens Fotográficas Subamostradas**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Engenharia Mecânica da Escola de Engenharia de São Carlos como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Ciências, Programa de Engenharia Mecânica.

Área de Concentração:
Dinâmica de Máquinas e Sistemas
Orientador: Prof. Dr. Rodrigo Nicoletti

Este Exemplar foi revisado, sob responsabilidade única do autor, em relação ao original, o qual se encontra disponível no Departamento de Engenharia Mecânica da EESC/USP.
--

São Carlos
2013

AUTORIZO A REPRODUÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTE TRABALHO,
POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO, PARA FINS
DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE.

E56m Endo, Marcos Tan
 Medição de Vibrações Estruturais e de Sistemas
Rotativos Utilizando Imagens Fotográficas Subamostradas
/ Marcos Tan Endo; orientador Rodrigo Nicoletti. São
Carlos, 2013.

Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação
em Engenharia Mecânica e Área de Concentração em
Dinâmica de Máquinas e Sistemas -- Escola de Engenharia
de São Carlos da Universidade de São Paulo, 2013.

1. Instrumentação. 2. Fotogrametria digital. 3.
Subamostragem. 4. Vibrações mecânicas. 5. Dinâmica de
rotores. 6. Análise modal operacional. I. Título.

FOLHA DE JULGAMENTO

Candidato: Engenheiro **MARCOS TAN ENDO**.

Título da dissertação: "Medição de vibrações estruturais e de sistemas rotativos utilizando imagens fotográficas subamostradas".

Data da defesa: 29/11/2013

Comissão Julgadora:

Resultado:

Prof. Dr. **Rodrigo Nicoletti (orientador)**
(Escola de Engenharia de São Carlos/EESC)

Aprovado

Prof. Dr. **Daniel Varela Magalhães**
(Escola de Engenharia de São Carlos/EESC)

APROVADO

Prof. Dr. **Arlindo Neto Montagnoli**
(Universidade Federal de São Carlos/UFSCar)

Aprovado

Coordenador do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica:
Prof. Associado **Marcelo Areias Trindade**

Presidente da Comissão de Pós-Graduação:
Prof. Titular **Denis Vinicius Coury**

*"[...] talvez não tenha conseguido fazer o melhor,
Mas lutei para que o melhor fosse feito [...]*

*Não sou o que deveria ser,
Mas Graças a Deus, não sou o que era antes."*

Martin Luther King (1929-1968)

*Dedico este trabalho a minha esposa Daniella H. Petrilli Endo e a minha filha Yasmin
Petrilli Endo, que com todo o amor e carinho, sempre estiveram ao meu lado me
incentivando e me apoiando incondicionalmente nesta jornada.*

Agradecimentos

Agradeço em primeiro lugar a Deus por estar presente em todos os momentos da minha vida.

Ao Prof. Dr. Rodrigo Nicoletti pela oportunidade concedida, além da amizade, dedicação e incentivo ao longo do desenvolvimento deste trabalho.

Ao Prof. Dr. Arlindo Neto Montagnoli do departamento de Engenharia Elétrica da UFSCar pelo desenvolvimento do sistema de controle da câmera e amizade nos momentos difíceis deste trabalho.

A todos os funcionários do Laboratório de Dinâmica da Escola de Engenharia de São Carlos.

Aos colegas do Laboratório de Dinâmica pela amizade, auxílio e compreensão.

Aos colegas de trabalho da UFSCar pelo incentivo no desenvolvimento deste trabalho.

Aos meus familiares pelo amor, incentivo e apoio.

E a todos que de alguma forma contribuíram para a realização deste trabalho.

Sumário

Lista de Figuras	xiii
Lista de Tabelas	xix
Nomenclatura	xxi
Resumo	xxv
Abstract	xxvii
1 Introdução	1
1.1 Objetivos	3
1.2 Organização do Trabalho	3
2 Revisão de literatura	5
2.1 Fotogrametria	6
2.2 Aplicações da Fotogrametria Digital	8
2.2.1 Medições com Câmeras Convencionais	10
2.2.2 Medições com Câmeras de Alta Velocidade	11
2.3 Conclusão	13
3 Metodologia de Medição	15
3.1 Câmera	15
3.2 Subamostragem	18
3.3 Controle da Câmera	21
3.4 Iluminação	22
3.5 Calibração	25
3.6 Mira	28
3.7 Análise das Imagens	32
4 Resultados Experimentais	35

4.1	Medição Estrutural	36
4.1.1	Resultados com Sinal de Excitação Senoidal	40
4.1.2	Resultados com Sinal de Excitação Quadrado	45
4.2	Medição da Órbita de Eixos	49
5	Análise Modal Operacional	61
5.1	Fundamentação Teórica	61
5.2	Resultados Experimentais	62
6	Conclusões	71
6.1	Trabalhos futuros	72
	Referências Bibliográficas	73
A	Programa em Assembly do controle da câmera	79
B	Código de conversão pixel para milímetros	85
C	Diagrama Esquemático do Circuito Elétrico de Controle da Câmera	87

Lista de Figuras

FIGURA 2.1	Fotogrametria aérea.	6
FIGURA 2.2	Fotogrametria terrestre.	7
FIGURA 2.3	Linha do tempo da fotogrametria.	8
FIGURA 2.4	Sistema de medição com laser e câmera CCD (KUMAR; SHAKHER, 2004).	9
FIGURA 2.5	Exemplos de câmeras digitais não métricas e métricas.	10
FIGURA 2.6	Câmeras de alta velocidade.	12
FIGURA 3.1	Kit modelo DVC24: 1) Motor 12 V, 2) Disco de latão, 3) Encoder, 4) Transformador 12 V, 5) Visor de frequência.	16
FIGURA 3.2	Posicionamento da mira nos testes realizados com kit para controle de motores.	16
FIGURA 3.3	Comparativo das imagens em diferentes ISO	18
FIGURA 3.4	Métodos de subamostragem.	19
FIGURA 3.5	Subamostragem sequencial.	20
FIGURA 3.6	Hardware do sistema de controle: 1) Regulador de tensão, 2) Conversor de nível lógico TTL serial RS-232, 3) Microcontrolador PIC16F628a, 4) Isolador óptico.	22
FIGURA 3.7	Tela de interface do software: 1) Seleção da porta serial, 2) Disparo remoto da câmera, 3) Cálculo das condições iniciais, 4) Número de ciclos entre cada disparo, 5) Número de disparos em cada frequência, 6) Ajuste da frequência real, 7) Captura das imagens.	22

FIGURA 3.8	Refletores com lâmpadas incandescentes halógenas.	24
FIGURA 3.9	Módulos compostos de LEDs e conjunto óptico.	24
FIGURA 3.10	Modelo de transformação das coordenadas globais 3D para as coordenadas 2D da imagem.	26
FIGURA 3.11	Modelo de calibração com 42 quadrados de 5 mm cada.	28
FIGURA 3.12	Modelo de calibração com abertura central e quadrados de 5 mm cada.	29
FIGURA 3.13	Teste com alvos localizados em diferentes distâncias do centro do eixo.	29
FIGURA 3.14	Miras inicialmente desenvolvidas e testadas no sistema rotativo.	30
FIGURA 3.15	Segunda versão de miras para medição de vibração em sistemas rotativos.	31
FIGURA 3.16	Dois tipos de miras desenvolvidas para sistemas estruturais. .	32
FIGURA 4.1	Viga engastada utilizada nos experimentos.	37
FIGURA 4.2	Aparato experimental para medição de vibração estrutural: 1) Módulos de iluminação, 2) Câmera na vertical.	37
FIGURA 4.3	Sistema de excitação da estrutura.	38
FIGURA 4.4	Sinais de excitação da estrutura.	38
FIGURA 4.5	Captura do sinal de vibração da estrutura pelo vibrômetro laser Doppler.	39
FIGURA 4.6	Imagens capturadas para a calibração da câmera em diferentes orientações do modelo de calibração.	39
FIGURA 4.7	Estrutura vibrando com frequência $f = 2,02$ Hz.	41
FIGURA 4.8	Comparação dos resultados apresentados pela técnica fotogra- métrica e vibrômetro laser Doppler na frequência $f = 2,02$ Hz (vibração estrutural).	42
FIGURA 4.9	Estrutura vibrando com frequência $f = 6,60$ Hz.	43

FIGURA 4.10 Comparação dos resultados apresentados pela técnica fotogramétrica e vibrômetro laser Doppler na frequência $f = 6,60$ Hz (vibração estrutural).	44
FIGURA 4.11 Estrutura vibrando com frequência $f = 14,2$ Hz.	45
FIGURA 4.12 Comparação dos resultados apresentados pela técnica fotogramétrica e vibrômetro laser Doppler na frequência $f = 14,2$ Hz (vibração estrutural).	46
FIGURA 4.13 Estrutura vibrando com sinal de excitação quadrado em frequência fundamental $f = 3,18$ Hz.	47
FIGURA 4.14 Comparação dos resultados apresentados pela técnica fotogramétrica e vibrômetro laser Doppler com sinal quadrado de excitação . .	48
FIGURA 4.15 Bancada de testes do sistema rotativo: 1) Mancais de rolamento, 2) Eixo de aço carbono, 3) Discos de aço carbono, 4) Motor elétrico.	49
FIGURA 4.16 Aparato experimental para a medição da órbita do eixo: 1) Módulos de iluminação, 2) Câmera fotográfica.	50
FIGURA 4.17 Posicionamento dos sensores de proximidade indutivo no sistema rotativo.	50
FIGURA 4.18 Resposta vibratória nas direções X e Y e localização das frequências de ressonância do sistema rotativo.	51
FIGURA 4.19 Imagens capturadas para a calibração da câmera em diferentes orientações do modelo de calibração.	52
FIGURA 4.20 Comparação entre as medições da câmera e do sensor de proximidade na frequência de rotação de $4,74$ Hz.	53
FIGURA 4.21 Comparação entre as medições da câmera e do sensor de proximidade na frequência de rotação de $4,74$ Hz - Órbita do eixo.	53
FIGURA 4.22 Comparação entre as medições da câmera e sensor de proximidade na frequência de rotação de $9,72$ Hz.	55
FIGURA 4.23 Comparação entre as medições da câmera e sensor de proximidade na frequência de rotação de $9,72$ Hz - Órbita do eixo.	55

FIGURA 4.24	Comparação entre as medições da câmera e sensor de proximidade na frequência de rotação de 13,72 Hz.	56
FIGURA 4.25	Comparação entre as medições da câmera e do sensor de proximidade na frequência de rotação de 13,72 Hz - Órbita do eixo.	56
FIGURA 4.26	Comparação entre as medições da câmera e do sensor de proximidade na frequência de rotação de 15,73 Hz.	57
FIGURA 4.27	Comparação entre as medições da câmera e sensor de proximidade na frequência de rotação de 15,73 Hz - Órbita do eixo.	57
FIGURA 4.28	Comparação entre as medições da câmera e do sensor de proximidade na frequência de rotação de 16,22 Hz.	58
FIGURA 4.29	Comparação entre as medições da câmera e sensor de proximidade na frequência de rotação de 16,22 Hz - Órbita do eixo.	58
FIGURA 5.1	Aparato experimental utilizado na análise modal operacional da estrutura.	62
FIGURA 5.2	Sinal periódico gerado para excitar o sistema estrutural (sinal de Schroeder).	63
FIGURA 5.3	Algumas das imagens capturadas para a calibração da câmera em diferentes orientações do modelo de calibração.	64
FIGURA 5.4	Localização dos pontos utilizados nos experimentos de Análise Modal Operacional.	65
FIGURA 5.5	Comparação entre as medições da câmera e do vibrômetro laser Doppler no ponto 1 da estrutura.	66
FIGURA 5.6	Comparação entre as medições da câmera e do vibrômetro laser Doppler no ponto 2 da estrutura.	66
FIGURA 5.7	Comparação entre as medições da câmera e do vibrômetro laser Doppler no ponto 3 da estrutura.	66
FIGURA 5.8	Comparação entre as medições da câmera e do vibrômetro laser Doppler no ponto 4 da estrutura.	67
FIGURA 5.9	Comparativo do primeiro modo de vibrar da viga engastada.	69

FIGURA 5.10 Comparativo do segundo modo de vibrar da viga engastada. . 69

Lista de Tabelas

TABELA 2.1	Comparação entre as câmeras digitais.	13
TABELA 4.1	Configurações Nikon D3100.	35
TABELA 4.2	Configurações do LED.	36
TABELA 4.3	Parâmetros extrínsecos da câmera para o sistema estrutural. .	40
TABELA 4.4	Parâmetros intrínsecos da câmera para o sistema estrutural. .	40
TABELA 4.5	Frequências de rotação reais do sistema.	51
TABELA 4.6	Parâmetros intrínsecos da câmera para o sistema rotativo. . .	52
TABELA 4.7	Parâmetros extrínsecos da câmera para o sistema rotativo. . .	53
TABELA 5.1	Parâmetros intrínsecos da câmera para o sistema estrutural na análise modal operacional.	64
TABELA 5.2	Parâmetros extrínsecos da câmera para o sistema estrutural na análise modal operacional.	64
TABELA 5.3	Frequências naturais do sistema estrutural.	68
TABELA 5.4	Comparativo dos dois primeiros modos de vibração do sistema estrutural.	68

Nomenclatura

Letras Latinas

cx, cy	Coordenadas do centro do eixo [mm]
$\tilde{c}$	Vetor não homogêneo do centro da câmera
f	Frequência [Hz]
$f(t)$	Função no tempo
k	Número inteiro de períodos
k_1, k_2	Coeficientes da distorção radial da lente
K	Matriz dos parâmetros intrínsecos da câmera
m	Vetor de coordenadas do ponto 2D
$\tilde{m}$	Coordenada homogênea do ponto 2D
$\hat{m}$	Projeção do ponto w na imagem
n	Número inteiro
n_c	Número de pontos capturados
n_i	Número de imagens
np	Número de pontos nas imagens
p_4	Última coluna da matriz P
p_k	Peso relativo do k-ésimo harmônico
px_1, py_1, px_2, py_2	Coordenadas dos pontos da mira [mm]
P	Matriz projeção perspectiva 3x4
r	Raio [mm]
R	Matriz rotação da câmera
s	Fator de escala arbitrário
S	Matriz diagonal

t	Vetor translação da câmera
T	Período de tempo [s]
T_p	Localização no tempo dos pontos capturados
T_s	Intervalo de tempo para amostragem
u, v	Coordenadas da imagem [pixel]
u_0, v_0	Coordenadas do ponto principal na imagem [pixel]
$\tilde{u}, \tilde{v}$	Coordenadas da imagem com distorção [pixel]
U, V	Matrizes ortogonais
V_l	Velocidade linear [mm/s]
x, y	Coordenadas da imagem sem distorção [mm]
$x(t)$	Função no tempo
$\tilde{x}$	Vetor não homogêneo das coordenadas globais
X, Y, Z	Coordenadas globais [mm]
w	Vetor de coordenadas do ponto 3D
$\tilde{w}$	Coordenada homogênea do ponto 3D

Letras Gregas

α_x, α_y	Distâncias focais da câmera [pixel]
γ	Deformação do pixel [rad]
Δs	Incremento de tempo em cada período [s]
θ	Ângulo em graus
θ_k	Ângulo de fase [rad]
ω	Velocidade angular [rad/s]

Abreviaturas

qps	Quadros por segundo
CCD	Dispositivo de carga acoplada (<i>Charge Coupled Device</i>)
CMOS	Semicondutor metal-óxido complementar (<i>Complementary Metal-Oxide-Semiconductor</i>)
DC	Corrente direta (<i>Direct Current</i>)

DSLR	reflex monobjetiva digital (<i>Digital Single-Lens Reflex</i>)
DSPI	Interferometria digital de padrões de speckle (<i>Digital Speckle Pattern Interferometry</i>)
ESPI	Interferometria eletrônica de padrões de speckles (<i>Electronic Speckle Pattern Interferometry</i>)
FDD	Decomposição no Domínio da Frequência (<i>Frequency Domain Decomposition</i>)
ISO	Organização Internacional para Padronização (<i>International Organization for Standardization</i>)
LDV	Vibrômetro laser Doppler (<i>Laser Doppler Vibrometer</i>)
LED	Diodo emissor de luz (<i>Light Emitting Diode</i>)
LVDTs	Transformadores lineares diferenciais variáveis (<i>Linear Variable Differential Transformers</i>)
NTSC	Comitê Nacional do Sistema de Televisão (<i>National Television System Committee</i>)
PCI	Interconector de Componentes Periféricos (<i>Peripheral Component Interconnect</i>)
SVD	Decomposição em valores singulares (<i>Singular Value Decomposition</i>)
VGA	Ordem de gráficos de vídeo (<i>Video Graphics Array</i>)

Resumo

Endo, M. T. **Medição de Vibrações Estruturais e de Sistemas Rotativos Utilizando Imagens Fotográficas Subamostradas**. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, São Carlos, 2013.

A análise de vibrações nos sistemas estruturais e rotativos permite detectar problemas indesejáveis, como a fadiga estrutural e o desgaste excessivo, que contribuem para a redução da vida útil do sistema e seus componentes. Tradicionalmente, a medição das vibrações é realizada por sensores de contato (acelerômetros e extensômetros), que possuem como inconveniente a adição de sua massa no sistema. Como alternativa, existem os sensores de não contato (LVD e ESPI), que são equipamentos de custo elevado. Este trabalho visa o desenvolvimento de um equipamento de baixo custo que realize medições multi-pontos sem contato do comportamento vibratório de estruturas e eixos rotativos. O método proposto utiliza como base os princípios da fotogrametria em conjunto com técnicas de subamostragem, que são utilizadas em estruturas ou máquinas com frequências de vibração conhecidas (e.g máquinas rotativas). A metodologia foi inicialmente aplicada em uma viga engastada-livre, excitada periodicamente por um *shaker* eletrodinâmico e posteriormente em um sistema rotativo montado em um bancada de testes. A viabilidade em se utilizar o método foi verificada comparando os resultados obtidos com as medições realizadas por um vibrômetro laser Doppler, no caso do sistema estrutural, e por sensores de proximidade indutivo nas vibrações do eixo rotativo. Com base nos comparativos, conclui-se que este método, mesmo apresentando limitações de resolução, pode ser perfeitamente empregado em medições de sistemas estruturais e rotativos assim como na análise modal operacional de estruturas.

Palavras-chave: análise modal operacional, dinâmica de rotores, fotogrametria digital, instrumentação, subamostragem, vibrações mecânicas.

Abstract

Endo, M. T. **Measurement of Vibration in Structural and Rotating Systems Using Sub-Sampled Photographic Images**. Dissertation (Master) - Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, São Carlos, 2013.

The analysis of vibrations in structural and rotating systems allows the detection of undesirable problems, such as the structural fatigue and excessive wear, which contribute to the reduction of the useful life of the systems and their components. Traditionally, the measurement of vibrations is carried out by contacting sensors (accelerometers and strain gauges), which have the inconvenience of adding mass into the system. Alternatively, there are the non-contacting sensors (LVD and ESPI), which are high cost equipments. This work aims at developing a low cost equipment that carry out multi-point non-contact measurements of the vibratory behavior of structures and rotating shafts. The proposed method uses as a basis the principles of photogrammetry together with sub-sampling techniques, which are used in structure or machines with known vibration frequencies (e.g rotating machines). The methodology was initially applied on a cantilever beam, periodically excited by an electrodynamic shaker and later in a rotating system mounted on a test bench. The feasibility of using the method was verified comparing the results obtained with measurements from a laser Doppler vibrometer, in the case of the structural system, and with inductive proximity sensors in the rotating shaft vibration. Based on the comparison analysis, one observes that this method can be perfectly used in vibration measurements in structural and rotating systems even with limitations in resolution as well as in operational modal analysis of structures.

Keywords: operational modal analysis, rotor dynamics, digital photogrammetry, instrumentation, sub-sampling, mechanical vibration.

Capítulo 1

Introdução

Sistemas mecânicos e estruturais são encontrados em diferentes áreas da engenharia e estão suscetíveis aos fenômenos de vibração, os quais em sua maioria devem ser medidos e analisados. O entendimento do comportamento vibratório desses sistemas é de fundamental importância no desenvolvimento de projetos, na obtenção de construções seguras, na utilização e operação de uma variedade de máquinas e estruturas (RAO, 2007). Além disso, as vibrações causam problemas indesejáveis, como o desgaste excessivo de rolamentos e engrenagens assim como fadigas estruturais, que ocasionam a diminuição da vida útil do sistema e seus elementos.

Devido a esses fatos, diferentes técnicas são utilizadas para a medição de vibrações, podendo ser divididas em:

- **sensoriamento de contato:** caso dos acelerômetros, extensômetros e o *Linear Variable Differential Transformers* (LVDTs). Esses sensores necessitam estar acoplados aos sistemas medidos, gerando inconvenientes, como a adição de suas massas no sistema e a dificuldade de instalação em locais de difícil acesso;
- **sensoriamento sem contato:** não necessita de nenhum tipo de contato físico com o sistema, como por exemplo o vibrômetro laser Doppler e os sensores de proximidade. Estes sensores possuem um custo relativamente elevado, quando comparados com os sensores de contato tradicionais.

Nas duas metodologias as medições são geralmente realizadas em um ponto específico, sendo necessário em alguns casos a utilização de inúmeros sensores ou uma

maior quantidade de amostras do sistema, aumentando significativamente o tempo de montagem e execução das medições.

O crescente avanço tecnológico contribui para o surgimento de novas técnicas de medição, dentre elas, podem-se citar a videogrametria e a fotogrametria, que consistem na determinação de informações geométricas ou métricas de imagens capturadas através de câmeras de vídeo ou fotográficas (LIU *et al.*, 2012). Entretanto, para a medição de deslocamentos dinâmicos de pequena amplitude, menores que 1 mm, e frequências superiores a 15 Hz, é necessário o uso de equipamentos com alta resolução da imagem e taxa de amostragem superior a 30 quadros por segundo (qps), levando-se em conta o teorema de Nyquist. Patsias e Staszewski (2002) realizaram medições de vibração em uma viga cantilever, por meio de uma câmera profissional rápida, que possuía taxa de amostragem de até 600 qps e resolução máxima de 640 x 240 pixels. Contudo, devido à baixa resolução do equipamento, as medições foram realizadas para deslocamentos vibratórios superiores a 40 mm.

Atualmente, as câmeras que possuem alta resolução e elevada taxa de amostragem, são projetadas para realizar medições de alta precisão, necessitando assim, satisfazer rigorosos requisitos ópticos e geométricos, sendo conhecidas como câmeras métricas. No entanto, estas câmeras possuem um valor relativamente alto, além de requerer uma calibração de fábrica, a qual não pode ser posteriormente alterada (CHANG; JI, 2007). Assim, câmeras digitais não métricas, que basicamente são equipamentos comerciais de baixa precisão, vêm sendo comumente empregadas na fotogrametria devido ao seu baixo custo e à possibilidade de calibração em diversos tipos de ambiente. Entretanto, estas câmeras comerciais devem ser rigorosamente calibradas para que os efeitos das distorções da lente, e os erros de posicionamento causados pela sua rotação e translação, sejam minimizados.

Desta forma, este trabalho propõe o desenvolvimento e a utilização de um equipamento de baixo custo, capaz de realizar medições multi-pontos sem contato, em sistemas mecânicos e estruturais, com o auxílio de apenas um sensor, uma câmera fotográfica convencional, que possui frequência de amostragem limitada a 3 fotos por segundo. Devido a este fato, o sinal medido será reconstruído através do método da subamostragem, que consiste na reconstrução do sinal a partir da medição de diferentes períodos em um longo tempo de amostragem.

1.1 Objetivos

O objetivo geral deste trabalho é utilizar uma câmera fotográfica convencional para medir os deslocamentos dinâmicos de sistemas estruturais e rotativos, com frequências máximas de excitação próximas de 18 Hz.

No presente trabalho podem-se mencionar como objetivos específicos:

- utilização da técnica de subamostragem para a reconstrução dos sinais de resposta;
- calibração da câmera fotográfica em cada sistema, extraíndo os parâmetros intrínsecos (distorção radial, distância focal, ponto principal) e extrínsecos (rotação e translação);
- controle do disparo e acionamento remoto da câmera fotográfica;
- identificação do tipo de iluminação que será utilizada para as medições;
- desenvolvimento das miras com os pontos de interesse que serão fixados nos sistemas estruturais e rotativos;
- comparação dos resultados com resultados obtidos a partir de sistemas de medição comerciais (vibrômetro laser Doppler e sensores de proximidade indutivo).

1.2 Organização do Trabalho

O trabalho está organizado para que primeiramente haja um entendimento sobre a utilização da técnica fotogramétrica em medições de deslocamentos dinâmicos. Em seguida, estudam-se os itens necessários para a aplicação da técnica nos sistemas estruturais e rotativos, verificando-se experimentalmente a viabilidade na utilização do método proposto de medição. Assim, tem-se:

- **Capítulo 2 - Revisão Bibliográfica:** é constituído por três seções, onde a primeira aborda os conceitos da fotogrametria e seu desenvolvimento no decorrer dos anos; a segunda descreve as aplicações da fotogrametria e os tipos de equipamentos utilizados; e a terceira apresenta uma breve conclusão do capítulo.

- **Capítulo 3 - Metodologia de Medição:** abordam-se os estudos dos equipamentos e métodos necessários para a utilização da técnica fotogramétrica nas medições das vibrações em sistemas estruturais e rotativos.
- **Capítulo 4 - Resultados Experimentais:** apresentam-se os resultados experimentais do método proposto e a comparação com técnicas já consolidadas de medições das vibrações. A metodologia é aplicada em um sistema estrutural (viga cantilever) e em um sistema rotativo.
- **Capítulo 5 - Análise Modal Operacional:** aplica-se a técnica desenvolvida de medição para extrair as informações necessárias para a análise modal de uma estrutura (viga cantilever).
- **Capítulo 6 - Conclusões:** apresentam-se as conclusões obtidas e as propostas para trabalhos futuros.

Capítulo 2

Revisão de literatura

Na literatura, podem ser encontrados diversos métodos experimentais para medir deslocamentos vibratórios, sendo os acelerômetros, os transdutores de força e extensômetros, os sensores tradicionalmente utilizados para tal finalidade. Estes sensores possuem como característica comum a necessidade de sua fixação no sistema. Entretanto, devido ao fato de muitos sistemas mecânicos e estruturais estarem localizados em ambientes de elevada temperatura, difícil acesso, ou operando em condições perigosas e de difícil aplicação, o emprego destes sensores de contato torna-se inviável. Sendo necessária a utilização de instrumentos capazes de realizar medições a uma distância segura, como o caso dos *non-scanning laser Doppler vibrometer* (vibrômetro laser Doppler de não varredura) e sensores de proximidade.

Contudo, estes sensores sem contato, assim como os sensores de contato citados, possuem como inconveniente a realização de medições em um único ponto. Khan, Stanbridge e Ewins (2000) utilizaram um dispositivo conhecido como *scanning Doppler laser vibrometer* (vibrômetro laser Doppler de varredura) para a realização de medições vibracionais sem contato em diferentes pontos de uma estrutura. Entretanto, a desvantagem na utilização deste dispositivo está relacionada com seu alto custo. Portanto, a utilização de câmeras digitais é uma alternativa para a realização de medições de vibrações em sistemas mecânicos e estruturais, considerando que o sensor, a câmera, consegue realizar medições multi pontos sem contato, também conhecida na literatura como *full field measurement*.

A revisão bibliográfica que será apresentada neste capítulo possui o objetivo de in-

trodur a técnica da fotogrametria, o seu desenvolvimento e sua utilização em medições de vibrações.

2.1 Fotogrametria

A fotogrametria possui mais de um século de história e desenvolvimento, e pode ser definida como uma ciência baseada em uma tecnologia que, através de imagens, consegue realizar medições e interpretações sobre a forma e a localização de um objeto a partir de uma ou mais fotografias (LUHMANN *et al.*, 2006; LINDER, 2009). Portanto, a fotogrametria é apresentada como um técnica de medição que, por meio de fotografias, consegue estabelecer uma perfeita relação entre um objeto tridimensional (3D) e suas imagens fotográficas bidimensionais (2D).

A técnica fotogramétrica informalmente é dividida em duas categorias: a aerofotogrametria (Figura 2.1) e a fotogrametria terrestre (Figura 2.2), também conhecida como fotogrametria a curta distância, que é o termo utilizado quando a distância do objeto a ser medido é menor que 100 metros (ATKINSON, 1996). A aerofotogrametria é tradicionalmente aplicada em geomática, uma área tecnológica que coleta e analisa informações geográficas, e as imagens fotográficas geralmente são capturadas por aeronaves. A técnica fotogramétrica terrestre ou à curta distância utiliza imagens fotográficas capturadas de uma posição fixa no terreno e é amplamente utilizada na indústria automotiva, arquitetura, medicina e em diversas áreas da engenharia.

Figura 2.1: Fotogrametria aérea.

Figura 2.2: Fotogrametria terrestre.

As câmeras fotográficas e as câmeras de vídeo são os equipamentos tipicamente utilizados nas medições fotogramétricas. Devido à evolução tecnológica destes equipamentos, a fotogrametria pode ser dividida em três sub-áreas, como representadas na Figura 2.3:

- **Fotogrametria analógica:** utiliza componentes ópticos-mecânicos para modelagem e processamento das imagens devido à inexistência nesta época (1901-1950) de equipamentos computacionais capazes de realizar os cálculos necessários dos projetos fotogramétricos. Os instrumentos usualmente utilizados possuíam nacionalidade suíça ou alemã, como os restituidores de projeção óptico-mecânico, sendo o mais conhecido no Brasil o B8S da Wild (FILHO; BRITO, 2007).
- **Fotogrametria analítica:** utiliza diapositivos fotográficos, assim como a fotogrametria analógica, devido à sua alta precisão e estabilidade dimensional. A principal característica desta metodologia está relacionada com a utilização de meios computacionais para o processamento analítico da relação tridimensional (3D) objeto e bidimensional (2D) imagem, reduzindo, desta forma, a participação instrumental no processo fotogramétrico.
- **Fotogrametria digital:** é a metodologia mais recente devido ao aumento tecnológico da captura direta de imagens com o auxílio de câmeras digitais. O processamento das informações é semelhante à fotogrametria analítica, necessitando de computadores capazes de solucionar sofisticados modelos matemáticos.

Figura 2.3: Linha do tempo da fotogrametria.

A rápida evolução tecnológica e a redução no valor das câmeras digitais contribuíram para o crescente desenvolvimento do método fotogramétrico digital, que possui como princípio a reconstrução automática do objeto (3D) a partir de suas imagens (2D) (FILHO; BRITO, 2007).

2.2 Aplicações da Fotogrametria Digital

Os primeiros trabalhos desenvolvidos analisando e processando imagens capturadas por câmeras digitais foram realizadas em conjunto com sistemas de medição a laser (Figura 2.4). Como exemplos de aplicação podem-se citar o ESPI e o DSPI, que são técnicas bem estabelecidas para medições de pequenas deformações, análise de vibrações e ensaios não destrutivos (RASTOGI, 2001). Buckberry *et al.* (2000) utilizaram a técnica ESPI associada a uma câmera de alta velocidade e taxa de amostragem de 4500 qps em medições de vibrações de componentes automotivos. Os estudos de vibrações em sistemas rotativos empregando esta mesma técnica foi desenvolvido por López *et al.* (2002), que utilizando uma câmera CCD no sistema NTSC e 30 qps, associada a um laser com taxa de amostragem de 60 Hz, realizaram estudos qualitativos das vibrações transversais em uma pá de ventilador. Kumar e Shakher (2004) e Mirza *et al.* (2006) estudaram as vibrações transversais em placas de alumínio utilizando a técnica DSPI, que por meio de um laser, uma câmera CCD e um sistema de aquisição de dados, conseguiram visualizar os modos de vibração da placa, reduzindo significativamente o tempo de processamento das imagens.

As duas metodologias apresentadas possuem como característica comum a reali-

Figura 2.4: Sistema de medição com laser e câmera CCD (KUMAR; SHAKHER, 2004).

zação de medições multi pontos sem contato. A sua elevada precisão nas medições é obtida com câmeras profissionais de alta velocidade e elevada taxa de amostragem, sendo necessário em alguns casos a sincronização precisa entre a câmera e o laser.

A evolução tecnológica, e o aperfeiçoamento eletrônico e computacional, beneficiaram o desenvolvimento de sistemas ópticos de medição utilizando apenas câmeras digitais e computadores para a captura e o processamento das imagens, respectivamente. Esta técnica de medição foi muito empregada com câmeras digitais de vídeo e, devido a este fato, pode ser também chamada de videogrametria, que basicamente utiliza os mesmos princípios da fotogrametria para a obtenção das informações das imagens de vídeo. Os primeiros trabalhos apresentados com esta técnica foram aplicados na área da engenharia civil, sendo inicialmente analisadas as deformações e defleções de estruturas de concreto (NIEDERÖST; MASS, 1997; WHITEMAN; LICHTI; CHANDLER, 2002).

De maneira geral, os trabalhos abordando as medições de vibrações utilizando os princípios da fotogrametria foram desenvolvidos com o auxílio de dois tipos de câmeras: câmeras digitais convencionais, que são equipamentos limitados, e câmeras profissionais de alta velocidade, que permitem medições em uma maior faixa de frequências.

2.2.1 Medições com Câmeras Convencionais

A facilidade na obtenção, na utilização e a significativa redução nos preços das câmeras digitais comerciais, contribuíram para o surgimento de novos trabalhos envolvendo análise de imagens. Olaszek (1999) foi um dos primeiros a utilizar câmeras de vídeo convencionais em conjunto com técnicas de visão computacional para analisar as características dinâmicas de pontes. Outros estudos abordaram as medições de vibrações no espaço tridimensional (3D), podendo-se citar como exemplos os trabalhos desenvolvidos por Ryall e Fraser (2002) que, com apenas uma câmera CCD perfeitamente sincronizada com a iluminação estroboscópica, determinaram, através da triangulação de pontos do objeto em diferentes fases, os modos de vibração tridimensional (3D) da asa de um avião; e Yoshida *et al.* (2003) que, utilizando três câmeras CCD sincronizadas com taxa de amostragem de 30 qps, mediram o comportamento dinâmico tridimensional de membranas.

As câmeras digitais são classificadas em semimétricas, não métricas e métricas. As câmeras semimétricas e não métricas, em geral são comerciais e necessitam ser calibradas para a minimização das distorções causadas por sua lente (Figura 2.5(a)). Já as câmeras métricas (Figura 2.5(b)) são projetadas e calibradas para uma determinada tarefa, não sendo possível a alteração de suas configurações. Com o intuito de flexibilizar a utilização das câmeras digitais comerciais, muitos algoritmos foram desenvolvidos para a calibração destas câmeras, sendo que as técnicas mais clássicas utilizam alvos quadriculados no plano bidimensional (ZHANG; SCHULZ; FERGUSON, 1999) e tridimensional (FAUGERAS; TOSCANI, 1986).

(a) câmera Nikon D3100 (não métrica) (b) câmera ALPA 12 (métrica)

Figura 2.5: Exemplos de câmeras digitais não métricas e métricas.

Chang e Ji (2007) e Chang e Xiao (2010), com o intuito de medir as vibrações tridimensionais em estruturas utilizando duas câmeras digitais de vídeo não métricas, com resolução de 1280 x 720 pixels e taxa de amostragem de 29.97 qps, desenvolveram um método de calibração em apenas duas etapas, sendo a primeira etapa uma calibração individual e a segunda etapa uma calibração estéreo das câmeras. Os resultados obtidos foram satisfatórios quando as frequências de vibrações foram inferiores a 5 Hz.

Com o objetivo em reduzir o custo dos sistemas de medições vibracionais, muitos estudos foram desenvolvidos com base nas câmeras digitais comerciais. Entretanto, devido às limitações dessas câmeras, como baixa resolução e taxa de amostragem fixa próximas de 30 qps, as vibrações medidas por estes sistemas não ultrapassam frequências de 12 Hz (CHUNG *et al.*, 2004; CHANG; JI, 2007; LEE; RHEE, 2013).

2.2.2 Medições com Câmeras de Alta Velocidade

Estudos mais recentes utilizam a técnica fotogramétrica em medições de vibrações estruturais com câmeras de alta velocidade. A utilização destes equipamentos mais sofisticados deve-se ao fato de muitas frequências de vibração serem superiores a 15 Hz e da taxa de amostragem das câmeras de vídeo tradicionais serem limitadas a 30 qps, acarretando o fenômeno chamado de aliasing, que ocorre quando a taxa de amostragem é menor que duas vezes o sinal que está sendo analisado.

As câmeras de alta velocidade (Figura 2.6) podem ser definidas como equipamentos capazes de capturar imagens em taxas de amostragem superiores a 100 qps (MAAS, 1992) e, devido a este fato, conseguem realizar medições de vibração em elevadas frequências. Entretanto, assim como as câmeras comerciais, é necessário uma rigorosa calibração para a determinação dos parâmetros intrínsecos (distorção radial, distância focal) e dos parâmetros extrínsecos da câmera (rotação e translação).

JEON *et al.* (2010), com uma câmera de alta velocidade em conjunto com um algoritmo denominado K-means, realizaram medições das vibrações de uma viga de aço excitada por um *shaker* eletrodinâmico, e compararam os resultados com métodos de medições convencionais (acelerômetros). Os erros nos resultados apresentados foram diretamente influenciados pela resolução e taxa de amostragem da câmera. Também com câmeras de alta velocidade, Ferrer *et al.* (2011) realizaram medições dos deslocamentos de uma coluna de aço submetida a um impacto lateral, comparando os resultados

Figura 2.6: Câmeras de alta velocidade.

obtidos com modelos de elementos finitos. Devido à baixa resolução da câmera, as medições foram realizadas a distâncias de no máximo 1 metro da estrutura.

Devido à crescente utilização de câmeras de alta velocidade para medições das vibrações, softwares comerciais foram desenvolvidos para o controle da câmera e o processamento das imagens. Helfrick *et al.* (2009b), utilizando o sistema comercial ARAMIS em conjunto com um par de câmeras de alta velocidade, com resolução de 1600 x 1200 pixels, realizaram medições de vibrações em vigas acrílicas. Utilizando o mesmo software e câmeras operando a 500 qps, Warren *et al.* (2010) realizaram medições das vibrações em turbinas eólicas.

As medições de deslocamentos dinâmicos com câmeras de alta velocidade podem causar o efeito denominado *motion blur* nas imagens adquiridas, que é causada devido ao movimento do objeto durante a formação da imagem. Este efeito pode ser minimizado aumentando-se a velocidade do obturador da câmera, isto é, diminuindo o tempo de exposição da luz no sensor CCD ou CMOS. Entretanto, quando o tempo de abertura do obturador é muito pequeno, há a necessidade de uma maior iluminação do objeto medido para que seja possível a formação e visualização da imagem.

Para solucionar estes problemas, as câmeras de alta velocidade são geralmente sincronizadas com equipamentos de alto poder de iluminação. Por exemplo, Helfrick *et al.* (2009a) utilizaram o sistema comercial ARAMIS com duas câmeras CCD de alta velocidade, de resolução de 1600 x 1200 pixels cada, sincronizadas com um estroboscópio e mediram as vibrações em palhetas rotativas. Outro exemplo pode ser visto em Ozbek *et al.* (2010) que, com a utilização de iluminação por LED sincronizada com quatro câmeras CCD e um computador, realizaram medições das respostas dinâmicas de uma turbina eólica.

As câmeras de alta velocidade são os equipamentos mais utilizados nas técnicas fotogramétricas atualmente. Entretanto, devido à sua baixa resolução, os erros em medições de pequenos deslocamentos dinâmicos são elevados, inviabilizando desta maneira algumas medições. Outro fato negativo está relacionado com o alto custo das câmeras e dos softwares de controle e processamento das imagens.

Na Tabela 2.1, são comparados os principais tipos de câmeras digitais utilizados na fotogrametria. Levando-se em conta o baixo custo, as câmeras digitais de vídeo e fotográficas comerciais são as mais recomendadas para a aplicação da fotogrametria. Entretanto, para medições de pequenas amplitudes de deslocamento, as câmeras de vídeo não são apropriadas, devido à baixa resolução em pixels das imagens.

Tabela 2.1: Comparação entre as câmeras digitais.

Câmeras Digitais	Métricas	Vídeo	Fotográficas	Alta Velocidade
Calibração de fábrica	sim	não	não	não
Resolução em pixels	alta	baixa	alta	baixa
Taxa de Amostragem	baixa	baixa	baixa	alta
Velocidade do Obturador	baixa	baixa	alta	alta
Custo	elevado	baixo	baixo	elevado

2.3 Conclusão

Técnicas de medição de vibrações em sistemas mecânicos e estruturais com câmeras digitais vêm sendo amplamente estudadas utilizando câmeras de vídeo e de alta velocidade, geralmente sincronizadas com equipamentos de alto poder luminoso, como luzes estroboscópicas e LEDs. Na literatura, as câmeras fotográficas digitais foram utilizadas apenas em seu modo de vídeo, isto é, de maneira semelhante à aplicação com câmeras de vídeo (LEE; RHEE, 2013).

Este trabalho propõe a utilização de técnicas fotogramétricas com apenas uma câmera fotográfica digital semimétrica/não métrica, de baixo custo e alta resolução, por meio de captura de imagens fotográficas e iluminação por LEDs. Neste caso, a principal diferença com os outros trabalhos já realizados é a utilização da técnica de subamostragem, a qual permitirá utilizar a câmera em seu modo de foto, resultando em imagens

com alta resolução e permitindo a medição de vibrações de amplitude inferior a 1 mm.

Capítulo 3

Metodologia de Medição

Neste capítulo, apresentam-se os equipamentos e os métodos necessários para a realização das medições vibracionais em sistemas rotativos e estruturais, com a câmera fotográfica digital não métrica e a técnica de subamostragem.

3.1 Câmera

A escolha da câmera foi a primeira etapa realizada para o desenvolvimento do sistema de medição. Entretanto, antes da utilização da câmera digital Nikon D3100 no método fotogramétrico, estudou-se algumas câmeras mais simples, como a WebCam Philips SPC530NC e a câmera digital Sony Cyber-Shot W320.

A WebCam foi inicialmente estudada devido à possibilidade de conexão direta com o computador, pela interface USB e, à facilidade no controle em tempo real através do *toolbox* existente no software MATLAB®, além do baixo custo para sua aquisição. A câmera testada possui como principais características a taxa de amostragem fixa em 30 qps e a resolução de 1.3 megapixels interpolados. A verificação da viabilidade em utilizar esta câmera foi feita em um kit para controle de motores, modelo DVC24, mostrado na Figura 3.1 (T&S EQUIPAMENTOS ELETRÔNICOS, 2005), que simula um sistema rotativo com frequências medidas por um encoder. Para a realização dos testes foi fixado em um quadrante do disco uma mira quadriculada (Figura 3.2), que indica o ponto de referência de cada imagem capturada.

No estudo, a WebCam foi sincronizada com um estroboscópio digital, modelo ITST-

Figura 3.1: Kit modelo DVC24: 1) Motor 12 V, 2) Disco de latão, 3) Encoder, 4) Transformador 12 V, 5) Visor de frequência.

Figura 3.2: Posicionamento da mira nos testes realizados com kit para controle de motores.

7600, com o propósito de melhorar a qualidade das imagens formadas. Entretanto, aumentando-se a frequência de rotação do sistema ocorre a diminuição da quantidade de imagens capturadas para a reconstrução de um período do movimento de rotação, pois não é possível alterar a taxa de amostragem da WebCam. Considerando-se que para a reconstrução de um período de oscilação são necessários no mínimo 7 pontos, isto é, a captura de pelo menos 7 imagens, as medições ficaram limitadas à frequência máxima de 4 Hz ($30 \text{ qps} / 4 \text{ Hz} = 7.5 \text{ imagens por período}$). Outro fato importante observado relaciona-se com a distância entre a câmera e o objeto medido, que devido à baixa resolução da WebCam em conjunto com lentes de baixa qualidade, restringiram as medições das vibrações para curtas distâncias. Sendo assim, decidiu-se pela utilização de uma câmera digital com maior resolução e lentes de melhor qualidade.

Seguindo estes critérios, testou-se a câmera Sony W320, uma câmera compacta,

que em seu modo vídeo reproduz imagens no formato VGA 640 x 480 pixels, com taxa de amostragem de aproximadamente 30 qps. A câmera foi estudada em sincronismo com o mesmo estroboscópio digital e configurações do kit para controle de motores. Entretanto, os experimentos demonstraram que mesmo utilizando uma câmera de qualidade superior, a taxa de amostragem fixa limitou as frequências de medição. Outros experimentos realizados utilizaram a câmera em seu modo fotográfico, mas devido à necessidade de um alto poder de sincronização entre a câmera e o estroboscópio, as medições tornaram-se inviáveis. Assim como a WebCam, a câmera Sony apresentou algumas limitações que impossibilitaram a sua utilização, como a baixa resolução no modo vídeo, taxa de amostragem fixa em 30 qps e a dificuldade em estabelecer uma conexão direta com o computador para o controle do disparo e sincronização como o estroboscópio.

Os estudos realizados com a WebCam e a câmera digital compacta identificaram as características primordiais que a câmera digital do sistema de medição deveria possuir: a necessidade de um equipamento com alta resolução; lentes de boa qualidade; interface com computador para o seu acionamento; e possibilidade de alteração da velocidade do obturador. Esta última característica se deve à dificuldade no desenvolvimento de um dispositivo capaz de controlar a câmera e o estroboscópio simultaneamente. As câmeras com estas características, e levando-se também em conta o baixo custo, ficaram restritas às denominadas DSLR, que são equipamentos profissionais ou semiprofissionais de alta qualidade, com objetivas intercambiáveis, configurações manuais para diferentes ambientes, e rapidez no disparo desde o acionamento mecânico até a formação da imagem, em milissegundos.

Assim como a WebCam e a câmera digital compacta, a câmera Nikon D3100 (DSLR) foi inicialmente testada no kit para controle de motores. Os testes preliminares demonstraram que, mesmo realizando filmagens em alta definição 1920 x 1080 pixels, com taxa de amostragem de 24 qps, as configurações não eram suficientes para a realização das medições em frequências superiores a 12 Hz. Devido a este fato, optou-se pela utilização da câmera em seu modo fotográfico, que amostra no máximo 3 fotos por segundo, mas possibilita a configuração manual da resolução e velocidade do obturador.

A Figura 3.3 apresenta os testes realizados com a câmera DSLR em sua máxima resolução (14,2 megapixels), com o sistema rotativo girando na frequência de 15 Hz,

Figura 3.3: Comparativo das imagens em diferentes ISO, com a mesma intensidade luminosa, onde (a, b, c) a velocidade do obturador é de 1/1200 s e em (d, e, f) de 1/4000 s.

sendo alteradas apenas a velocidade do obturador e a sensibilidade do sensor (ISO) da câmera. Observa-se que, com o aumento da velocidade do obturador, as imagens ficaram mais nítidas, diminuindo o efeito do escorregamento ou borrões. Entretanto, nota-se o escurecimento das imagens, quando comparadas com o mesmo valor de sensibilidade ISO, e a ocorrência deste fato relaciona-se com a redução do tempo que o sensor CMOS da câmera fica exposto à luz. A minimização deste escurecimento pode ser realizada de três maneiras: aumentando-se a sensibilidade ISO da câmera, aumentando-se a intensidade luminosa no objeto medido, ou ambas.

Após estes testes, definiu-se que a câmera DSLR (Nikon D3100) seria a câmera a ser utilizada na medição das vibrações estruturais e dos sistema rotativo.

3.2 Subamostragem

A utilização de uma câmera DSLR, com taxa de amostragem máxima de 3 fotos por segundo, e aplicando-se o processo de amostragem convencional, limitou a reconstrução do sinal para frequências inferiores a 1.5 Hz. A ocorrência deste fato deve-se à

necessidade de uma taxa de amostragem mínima para a recuperação completa do sinal original. Os primeiros estudos abordando este conceito foram realizados por Nyquist (1928) e Shannon (1949), que relataram a obrigatoriedade das frequências de amostragem serem iguais ou superiores a duas vezes as frequências dos sinais medidos, o que matematicamente pode ser escrito na forma:

$$\omega_s \geq 2\omega_m \quad (3.1)$$

onde ω_m é comumente conhecido como frequência de Nyquist (máxima frequência de interesse do sinal).

Devido à limitação da câmera em amostrar frequências superiores à de Nyquist, e à necessidade em realizar medições de frequências próximas a 17 Hz, não foi possível a utilização da técnica de amostragem convencional, fazendo-se necessário o emprego de uma metodologia conhecida como subamostragem. Entretanto, a reconstrução do sinal através deste método torna-se possível apenas em sinais periódicos com frequências reais conhecidas, e que não sofram alterações na forma da onda em seus períodos, isto é, que sejam sinais estacionários (RADER, 1977).

Pode-se classificar a técnica da subamostragem como coerente (Figura 3.4(a)), quando as amostras para a reconstrução do sinal são realizadas sequencialmente em diferentes períodos (FINK *et al.*, 2003), e incoerente (Figura 3.4(b)), quando o processo de amostragem ocorre de forma aleatória, necessitando de um algoritmo para o processamento e reconstrução do sinal original (CHOI; GOMES; CHATTERJEE, 2011).

Figura 3.4: Métodos de subamostragem.

A subamostragem coerente foi a técnica escolhida para a realização da discretização dos sinais de resposta dos sistemas rotativos e estruturais, sendo melhor explicada e entendida através da Figura 3.5, que mostra uma onda periódica $x(t)$ subamostrada sequencialmente em intervalos T_s .

Figura 3.5: Subamostragem sequencial.

Nota-se que para a perfeita reconstrução do sinal, há a necessidade da soma de um pequeno incremento em cada período amostrado, da forma:

$$T_s = n(kT + \Delta s), \quad n = 0, 1, 2, \dots \quad (3.2)$$

onde n é um número inteiro, k é o número inteiro de períodos entre amostras consecutivas, T é o período do sinal e Δs é o incremento adotado.

Para a reconstrução de um período do sinal a partir dos dados amostrados pelo método da subamostragem é imprescindível conhecer a frequência de vibração do sistema e o número de pontos amostrados. Assim, a localização temporal T_p de cada ponto amostrado no sinal reconstruído é escrito pela equação:

$$T_p = n \frac{T}{(n_c - 1)}, \quad n = 0, 1, 2, \dots \quad (3.3)$$

onde n é um número inteiro, T é o período do sinal e $n_c \neq 1$ é o número de pontos capturados para a reconstrução de um período.

As principais vantagens da reconstrução de um sinal pelo método da subamostragem se devem à possibilidade da realização de medições em frequências superiores à de

Nyquist, e ao controle da quantidade de pontos amostrados, que é realizado variando-se apenas o valor incremental Δs .

3.3 Controle da Câmera

A definição da utilização de uma câmera digital no modo fotográfico associada ao método da subamostragem coerente evidenciou a necessidade do desenvolvimento de um equipamento que fosse capaz de controlar remotamente o disparo do obturador da câmera e, além disso, calcular o valor incremental Δs de cada período amostrado, capturando automaticamente a sequência das imagens do objeto medido.

A importância em controlar uma câmera remotamente se deve à obrigatoriedade em realizar disparos periódicos e em manter a câmera estática durante a aquisição das imagens, para que o seu movimento quando acionada manualmente não interfira nas medições das vibrações. Alguns testes realizados com a câmera fixa em uma estrutura tipo tripé mostraram pequenas discrepâncias no posicionamento das imagens entre os dois métodos de captura. O acionamento manual provoca movimentos verticais na câmera que prejudicam a identificação dos reais deslocamento dinâmicos do sistema.

A perfeita reconstrução de um sinal pelo método da subamostragem coerente somente é possível sabendo-se os intervalos de tempo T_s entre cada imagem capturada. Assim, torna-se imprescindível a utilização de um sistema que controle o tempo de acionamento do obturador da câmera, lembrando-se que a máxima aquisição deste equipamento é de 3 fotos por segundo.

O sistema para o controle externo da câmera foi desenvolvido em parceria com o Professor Doutor Arlindo Neto Montagnoli, do Departamento de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de São Carlos. A Figura 3.6 mostra o hardware do sistema de medição, e a Figura 3.7 mostra a tela do programa desenvolvido no Microsoft Visual C# para controlar o hardware através do computador.

Basicamente, o software é responsável por enviar informações para o sistema de controle que a partir de um microcontrolador programado em código Assembly (Apêndice A), controla o estroboscópio digital e calcula os intervalos de tempo necessários para acionar a câmera fotográfica, de forma a se poder reconstruir um período do sinal com N pontos amostrados.

Figura 3.6: Hardware do sistema de controle: 1) Regulador de tensão, 2) Conversor de nível lógico TTL serial RS-232, 3) Microcontrolador PIC16F628a, 4) Isolador óptico.

Figura 3.7: Tela de interface do software: 1) Seleção da porta serial, 2) Disparo remoto da câmera, 3) Cálculo das condições iniciais, 4) Número de ciclos entre cada disparo, 5) Número de disparos em cada frequência, 6) Ajuste da frequência real, 7) Captura das imagens.

3.4 Iluminação

O simples aumento da sensibilidade ISO da câmera não é suficiente para melhorar a nitidez e reduzir o escurecimento das imagens aquisitadas. É necessária a utilização de uma iluminação artificial que aumente a intensidade luminosa dos pontos de interesse dos sistemas medidos.

A escolha da iluminação apropriada para o sistema de medição restringiu-se a três tipos de lâmpadas:

- vapor metálica;
- incandescente halógena;
- LED.

Inicialmente, buscou-se uma lâmpada com a temperatura de cor próxima à da luz do Sol em dia claro (Sol a pino), que é de aproximadamente 5500 K (ABRAMOWITZ; DAVIDSON, 2012), e que representa as condições ideais de iluminação de um objeto a ser fotografado. A lâmpada de vapor metálico tubular de 400 W foi a que mais se aproximou da temperatura desejada, com o valor de 5200 K. Entretanto, a utilização destas lâmpadas não se mostrou vantajosa devido à necessidade de equipamentos auxiliares, como reatores e ignitores para o seu funcionamento, que encarecem e dificultam a montagem destes sistemas de iluminação. Outras desvantagens em utilizar as lâmpadas de vapor metálico se devem ao elevado tempo gasto para estas lâmpadas atingirem o máximo fluxo luminoso, e às altas temperaturas de sua base (250°C) e bulbo (500°C) quando em funcionamento, que impossibilitam o manuseio e por consequência o ajuste de seu posicionamento.

Devido às inúmeras desvantagens em utilizar lâmpadas de vapor metálico nas medições, estudou-se a utilização das lâmpadas incandescentes halógenas, que possuem como principais vantagens o baixo custo, o funcionamento imediato, a ligação direta na energia elétrica e o tamanho reduzido. Os testes preliminares foram realizados com duas lâmpadas halógenas de 150 W, com cada lâmpada instalada em um refletor, o que aumenta consideravelmente o fluxo luminoso em uma determinada direção. Os resultados obtidos apresentaram-se insatisfatórios, sendo necessário a utilização de mais dois conjuntos de refletores e lâmpadas para melhorar a intensidade luminosa no objeto medido.

A Figura 3.8 mostra o posicionamento dos quatro refletores com lâmpadas de 150 W, para a medição das vibrações em um sistema rotativo. Nas medições realizadas, constatou-se algumas características negativas destes sistemas de iluminação, como a elevada radiação de calor, que pode alterar as características físicas do material

medido, e a não homogeneidade da intensidade luminosa, que afeta a formação das imagens com o aumento da frequência de rotação do sistema.

Figura 3.8: Refletores com lâmpadas incandescentes halógenas.

Visando manter a uniformidade e a qualidade das imagens adquiridas em diferentes frequências de rotação, realizaram-se testes com iluminação por LEDs, que basicamente são diodos semicondutores que emitem luz quando energizados. Os módulos de iluminação utilizados nos experimentos, foram cedidos pelo Eng. Luis Fernando Bettio Galli, da empresa DirectLight Indústria e Comércio, sendo cada módulo composto por um LED e um conjunto óptico que auxilia no direcionamento e focalização dos raios luminosos. Assim como as lâmpadas halógenas, utilizou-se inicialmente os módulos de iluminação para a medição das vibrações em um sistema rotativo, como mostrado na Figura 3.9.

Figura 3.9: Módulos compostos de LEDs e conjunto óptico.

Os resultados dos experimentos com iluminação por LEDs mostraram-se satisfatórios, e este fato se deve principalmente à alta eficiência luminosa e à pequena dissipação de calor apresentada por estes componentes, aliadas a um preciso conjunto óptico que maximizava a intensidade luminosa para um determinado ponto de interesse.

3.5 Calibração

Nesta seção, abordam-se os estudos realizados para a calibração da câmera digital não métrica, que é uma etapa imprescindível do sistema desenvolvido para a medição das vibrações. A importância em calibrar uma câmera se deve à necessidade em obter a real relação entre as coordenadas globais tridimensional (3D) do objeto medido com as coordenadas bidimensionais (2D) das imagens formadas.

Na literatura, inúmeros métodos de calibração foram propostos, podendo ser classificados de acordo com a geometria dos alvos de calibração, sendo divididos em três categorias:

Calibração 2D: Este método é o mais simples e o mais empregado nas calibrações, pois utiliza apenas um alvo planar, geralmente quadriculado, e com dimensões conhecidas, sendo posicionado em diferentes orientações (ZHANG, 2000).

Calibração 3D: Esta técnica utiliza um alvo não planar, que consiste da formação de dois ou três planos ortogonais um ao outro, com a geometria tridimensional conhecida (FAUGERAS, 1993). Apesar de sua eficiência, este método requer dispositivos caros de calibração além de elaboradas configurações do alvo.

Auto calibração: Este método não utiliza nenhum tipo de alvo para a calibração, e se baseia na análise de um conjunto de imagens arbitrárias não calibradas, capturadas com apenas o movimento da câmera em ambientes estáticos. Devido à necessidade em estimar um grande número de parâmetros, esta técnica requer o desenvolvimento de complexos algoritmos e difíceis equacionamentos matemáticos (FAUGERAS; LUONG; MAYBANK, 1992; MAYBANK; FAUGERAS, 1992).

Após a análise dos diferentes tipos de calibração, adotou-se como padrão para o sistema de medição o método de calibração 2D, que utiliza o modelo da câmera pinhole para formular a relação geométrica entre as coordenadas 3D do objeto e as coordenadas 2D da imagem, como mostrado na Figura 3.10. Entretanto, mesmo a câmera adotada não

sendo uma câmara pinhole, considera-se válido tal procedimento matemático devido à qualidade das lentes da câmara adotada.

Figura 3.10: Modelo de transformação das coordenadas globais 3D para as coordenadas 2D da imagem.

Neste caso, a coordenada de um ponto 2D da imagem é descrito pelo vetor $\mathbf{m} = [u, v]^T$, e o ponto 3D pelo vetor $\mathbf{w} = [X, Y, Z]^T$ em um sistema de coordenada global. A equação matemática que relaciona estes dois vetores é escrito como:

$$s\tilde{\mathbf{m}} = \mathbf{P}\tilde{\mathbf{w}} \quad (3.4)$$

onde s é um fator de escala arbitrário, $\tilde{\mathbf{m}} = [u, v, 1]^T$ e $\tilde{\mathbf{w}} = [X, Y, Z, 1]^T$ são as coordenadas homogêneas dos respectivos vetores $\mathbf{m}$ e $\mathbf{w}$, e $\mathbf{P}$ é a matriz de projeção perspectiva 3x4, que possui os parâmetros extrínsecos e intrínsecos da câmara, sendo representada por:

$$\mathbf{P} = \mathbf{K} \begin{bmatrix} \mathbf{R} & \mathbf{t} \end{bmatrix} \quad (3.5)$$

Na Equação (3.5), $[\mathbf{R} \ \mathbf{t}]$ são os parâmetros extrínsecos, rotação e translação da câmara, e $\mathbf{K}$ é a matriz dos parâmetros intrínsecos, que nas câmeras com sensor CCD ou CMOS são representadas em pixels, sendo escritas como:

$$\mathbf{K} = \begin{bmatrix} \alpha_x & \gamma & u_0 \\ 0 & \alpha_y & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.6)$$

onde (u_0, v_0) são as coordenadas do ponto principal na imagem em pixel, α_x e α_y são

as distâncias focais da câmera em pixel, e γ é a deformação do pixel em radianos.

Como descrito por Zhang (2000), os parâmetros da câmera são estimados pelo critério da máxima verossimilhança, minimizando a seguinte função:

$$\sum_{i=1}^{ni} \sum_{j=1}^{np} \|\mathbf{m}_{ij} - \hat{\mathbf{m}}(\mathbf{K}, \mathbf{R}_i, \mathbf{t}_i, \mathbf{w}_j)\|^2 \quad (3.7)$$

onde $\hat{\mathbf{m}}(\mathbf{K}, \mathbf{R}_i, \mathbf{t}_i, \mathbf{w}_j)$ é a projeção do ponto $\mathbf{w}_j$ na imagem i . Devido ao fato da função (3.7) ser uma minimização não linear, a solução é obtida através do algoritmo de Levenberg-Marquardt (MORE, 1977).

Sabendo-se os parâmetros extrínsecos e a matriz dos parâmetros intrínsecos, o próximo passo para a perfeita calibração de uma câmera não métrica é a correção das distorções radiais da lente. De acordo com Zhang (2000), os coeficientes k_1 e k_2 representam as distorções radiais da lente e podem ser calculados pela equação:

$$\begin{bmatrix} (u - u_0)(x^2 - y^2) & (u - u_0)(x^2 - y^2)^2 \\ (v - v_0)(x^2 - y^2) & (v - v_0)(x^2 - y^2)^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} k_1 \\ k_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \tilde{u} - u \\ \tilde{v} - v \end{bmatrix} \quad (3.8)$$

onde $\tilde{u}$ e $\tilde{v}$ são os pontos da imagem com distorção, e o cálculo dos coeficientes k_1 e k_2 é realizado pela minimização não linear da função:

$$\sum_{i=1}^{ni} \sum_{j=1}^{np} \|\mathbf{m}_{ij} - \hat{\mathbf{m}}(\mathbf{K}, k_1, k_2, \mathbf{R}_i, \mathbf{t}_i, \mathbf{w}_j)\|^2 \quad (3.9)$$

onde $\hat{\mathbf{m}}(\mathbf{K}, k_1, k_2, \mathbf{R}_i, \mathbf{t}_i, \mathbf{w}_j)$ é a projeção do ponto $\mathbf{w}_j$ na imagem i . Assim como a minimização não linear da função (3.7), a função (3.9) também pode ser minimizada pelo algoritmo de Levenberg-Marquardt (MORE, 1977).

Inicialmente, testaram-se dois tipos de modelos planos para a calibração da câmera digital em sistemas rotativos. A Figura 3.11 mostra o primeiro modelo desenvolvido posicionado em diferentes orientações, sendo constituído por 7x6 quadrados de 5 mm cada. Observa-se nas imagens que o alvo quadriculado foi posicionado apenas sobre o eixo, e os pontos de interesse nas medições encontram-se ao redor do eixo. Devido a este fato, os erros dos resultados obtidos com este tipo de modelo plano de calibração foram de aproximadamente 3%, quando comparados com as reais posições dos pontos de interesse.

Figura 3.11: Modelo de calibração com 42 quadrados de 5 mm cada.

O segundo modelo mostrado na Figura 3.12 é formado por 12x9 quadrados de 5 mm cada. A diferença em relação ao primeiro modelo deve-se a uma abertura central no alvo para o perfeito encaixe no eixo do sistema rotativo. Desenvolveu-se este tipo de alvo para cobrir o maior número possível dos pontos de interesse ao redor do eixo. Os erros dos resultados apresentados foram de aproximadamente 0,7%, portanto muito inferiores aos resultados do primeiro modelo de calibração.

Os experimentos realizados com os dois tipos de modelo quadriculado evidenciaram a necessidade em posicionar o alvo de calibração sobre os pontos de interesse. Observa-se também que, para a perfeita determinação dos parâmetros intrínsecos e extrínsecos da câmera pelo método de calibração 2D, necessita-se amostrar pelo menos 20 imagens do alvo de calibração, em diferentes orientações e com a mesma distância focal.

3.6 Mira

Os pontos de interesse para a análise das vibrações pelo método fotogramétrico são obtidos através do posicionamento e fixação de miras ou alvos de referência no sistema que se deseja medir. No presente trabalho, aborda-se o desenvolvimento e estudo de dois tipos de alvos, um para medições diretas (alvo de referência no exato ponto de medição das vibrações) e um outro para medições indiretas, em que o alvo não se encontra no

Figura 3.12: Modelo de calibração com abertura central e quadrados de 5 mm cada.

ponto em que é realizada a medição das vibrações. Como exemplos de medições diretas podem ser citadas as realizadas nos sistemas estruturais e de medições indiretas aquelas realizadas em sistemas rotativos.

Devido à necessidade de uma análise mais complexa para o posicionamento e desenvolvimento dos alvos de referência, nas medições indiretas das vibrações de eixos rotativos, diversos estudos foram realizados objetivando a otimização da posição e formato dos alvos. A Figura 3.13 mostra um eixo girando à frequência de 10 Hz, com dois alvos posicionados em distâncias distintas do seu centro.

Figura 3.13: Teste com alvos localizados em diferentes distâncias do centro do eixo.

Nota-se visualmente a maior nitidez do alvo posicionado mais próximo do centro do eixo. Este fato ocorre devido à relação de proporcionalidade direta entre a velocidade

linear do sistema rotativo e o raio em que se encontra o alvo, o que matematicamente escreve-se como:

$$V_l = \omega r, \quad \text{com } \omega = 2\pi f \quad (3.10)$$

onde V_l é a velocidade linear, r é o raio, ω é a velocidade angular e f é a frequência do sistema. Portanto, para a melhor nitidez do alvo, deve-se posicioná-lo com a menor distância possível do centro do eixo.

A Figura 3.14 mostra as duas miras desenhadas no Adobe Photoshop CS2, um editor de imagens bidimensionais com resolução de 400 pixels/cm. As miras possuem quadrados com 1.5 x 1.5 mm e os conjuntos de quadrados unidos pelos vértices estão separados por ângulos de 90° . Observa-se que a única diferença entre as miras das Figura 3.14(a) e 3.14(b) se deve à inclusão de quatro quadrados entre os conjuntos já existentes.

(a) primeira mira desenvolvida

(b) segunda mira desenvolvida

Figura 3.14: Miras inicialmente desenvolvidas e testadas no sistema rotativo.

As medições nos sistemas rotativos são indiretas porque faz-se necessário um cálculo para a localização do centro do eixo, que representa o real ponto de vibração do sistema rotativo. Para as duas miras apresentadas, o método proposto para o cálculo do centro do eixo consiste basicamente de duas etapas. A primeira etapa é determinar o raio dos pontos seleccionados na mira através da equação:

$$R = \sqrt{[(px_1 - px_2)^2 + (py_1 - py_2)^2] \cdot \left(\frac{\sin(90^\circ - \frac{\theta}{2})^2}{\sin(\theta)^2} \right)} \quad (3.11)$$

onde (px_1, py_1) e (px_2, py_2) representam as coordenadas dos dois pontos escolhidos na

mira e θ o ângulo entre os dois pontos. A segunda etapa utiliza o valor do raio encontrado para solucionar o seguinte sistema de equações:

$$\begin{cases} (px_1 - cx)^2 + (py_1 - cy)^2 = r^2 \\ (px_2 - cx)^2 + (py_2 - cy)^2 = r^2 \end{cases} \quad (3.12)$$

onde cx e cy são as coordenadas do centro do eixo nas direções x e y respectivamente.

Nos testes realizados com estas miras, verificou-se que o método aplicado para encontrar o centro do eixo informava diferentes posições das coordenadas (cx, cy) para uma mesma imagem, dificultando a localização do centro do eixo (ponto de interesse). Sendo assim, buscou-se uma metodologia que, a partir de n pontos equidistantes do centro do eixo, informasse um único valor das coordenadas (cx, cy) . O novo método foi desenvolvido aplicando-se a função de otimização `fminsearch` do MATLAB[®], que utiliza o algoritmo de busca Simplex de Nelder-Mead¹ para minimizar os pontos selecionados da mira em uma circunferência.

A segunda versão das miras para a medição das vibrações do centro do eixo foram desenvolvidas no CorelDRAW X4, um programa de desenho vetorial e impressas na resolução de 2400 x 2400 pontos por polegada, aumentando-se assim, sua precisão e qualidade. A Figura 3.15 mostra as miras projetadas, que basicamente são compostas por 16 circunferências de 4 mm de diâmetro, distantes 12,5 mm do centro da mira e separadas entre si por um ângulo de 22,5°.

Figura 3.15: Segunda versão de miras para medição de vibração em sistemas rotativos.

Os testes realizados com estas miras, juntamente com o método de minimização desenvolvido no software MATLAB[®], localizaram precisamente o centro do eixo rotativo,

¹J. A. Nelder e R. Mead descreveram um método para a minimização de uma função de n variáveis.

viabilizando assim a sua utilização nas medições.

Devido ao fato de se desejar medir as vibrações de sistemas estruturais no exato ponto de fixação do alvo, as miras desenvolvidas para estes sistemas são mais simples, como mostrado na Figura 3.16, e não necessitam de nenhum tipo de algoritmo para o cálculo das reais posições das vibrações.

Figura 3.16: Dois tipos de miras desenvolvidas para sistemas estruturais.

Assim como as miras utilizadas nas medições das vibrações dos sistemas rotativos, as miras dos sistemas estruturais foram desenvolvidas no CorelDRAW X4 e impressas na resolução de 2400 x 2400 pontos por polegada.

3.7 Análise das Imagens

A última etapa da metodologia proposta para as medições das vibrações nos sistemas rotativos e estruturais refere-se à localização em milímetros dos pontos de referência de cada imagem capturada. Sabendo-se que as coordenadas das imagens digitais apresentam-se em pixels, e comumente as medições dos deslocamentos vibracionais são realizados em milímetros, tornam-se indispensáveis os cálculos para a conversão em coordenadas milimétricas dos pontos selecionados nas imagens.

Basicamente, a equação de conversão das unidades em pixels para milímetros utiliza as informações obtidas na calibração da câmera, isto é, os seus parâmetros intrínsecos, dado pela matriz $\mathbf{K}$, e os parâmetros extrínsecos, representados pela rotação e translação da câmera. O cálculo dos valores em milímetros dos pontos escolhidos de cada imagem é escrito pela equação:

$$\mathbf{w} = \mu \begin{bmatrix} (\mathbf{KR})^{-1} \mathbf{m} \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} (\mathbf{KR})^{-1} p_4 \\ 1 \end{bmatrix} = \mu \begin{bmatrix} \tilde{\mathbf{x}} \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \tilde{\mathbf{c}} \\ 1 \end{bmatrix} \quad (3.13)$$

onde $\mathbf{w}$ representa as coordenadas no sistema global em milímetros, $\mathbf{m}$ são as coordenadas da imagem em pixels, p_4 a última coluna da matrix $\mathbf{P}$ descrita pela Equação

(3.5), $\tilde{\mathbf{x}}$ é um vetor não homogêneo que representa as coordenadas de um ponto nas coordenadas globais da imagem e $\tilde{\mathbf{c}}$ é o vetor não homogêneo do centro da câmera. Encontra-se o coeficiente μ pela equação:

$$\mu = -\frac{\tilde{c}_3}{\tilde{x}_3} \quad (3.14)$$

com $\tilde{c}_3$ e $\tilde{x}_3$ sendo os últimos elementos de cada vetor $\tilde{\mathbf{c}}$ e $\tilde{\mathbf{x}}$, respectivamente.

Com o intuito de agilizar e facilitar os cálculos da Equação (3.13), implementou-se um algoritmo no programa MATLAB[®], sendo apresentado no Apêndice B.

Capítulo 4

Resultados Experimentais

Neste capítulo, os resultados obtidos nas medições vibracionais por meio da técnica fotogramétrica estão divididos em duas seções: a primeira apresenta os experimentos realizados em um sistema estrutural e a segunda apresenta os resultados experimentais das vibrações da órbita de um eixo rotativo. Em ambos os sistemas, utilizou-se uma câmera fotográfica Nikon D3100 configurada de acordo com a Tabela 4.1, fixa em uma estrutura tipo tripé, que possui o objetivo de manter a câmera estática em uma posição de referência.

Tabela 4.1: Configurações Nikon D3100.

	Velocidade do Obturador	Lente	Resolução	ISO
Sistemas rotativos	1/4000 s	55-200 mm	14,2 MP	auto
Sistemas estruturais	1/4000 s	18-55 mm	14,2 MP	auto

Devido à necessidade de uma elevada luminosidade nos pontos de interesse dos sistemas medidos, cinco módulos de iluminação foram utilizados nos experimentos, sendo que cada módulo é composto por dois elementos: um conjunto óptico, constituído de uma lente convergente e um dissipador de calor, e por um LED com configurações descritas na Tabela 4.2. Para a alimentação dos módulos, empregou-se uma fonte de alimentação simétrica¹ DC digital Minipa MPL-3303.

Além disso, o fato de se utilizar o método da subamostragem para a aquisição das

¹Fonte de tensão contínua que fornece duas tensões, uma positiva e uma negativa em relação a um terminal comum.

Tabela 4.2: Configurações do LED.

Emissão	Lambertiana
Fluxo Luminoso	170 lm
Corrente de Operação	700 mA
Tensão Nominal	4 V
Temperatura de Cor	6500 K

imagens torna imprescindível o uso do sistema de controle da câmera especificado na Seção 3.3. Primeiramente, este sistema de controle associado ao estroboscópio digital modelo ITST-7600 identifica a real frequência de vibração do experimento. Uma vez obtida a frequência real, o microcontrolador presente neste sistema calcula o intervalo de tempo dos disparos da câmera, para que finalmente as imagens sejam capturadas.

4.1 Medição Estrutural

A fim de implementar o método proposto de medição das vibrações em sistemas estruturais, realizam-se experimentos em uma viga flexível de aço inox, com dimensões de 630 x 30 x 0,8 mm (comprimento x largura x espessura) e engastada em uma das extremidades. Três massas de 90 gramas cada são posicionadas conforme mostrado na Figura 4.1(a). Observa-se na Figura 4.1 a localização das cinco miras de referência fixadas ao longo da estrutura, sendo que três miras encontram-se sobre as massas e as outras duas entre elas. Na Figura 4.1(c), apresenta-se a mira com mais detalhe.

A localização da câmera fotográfica e do sistema de iluminação (montagem do aparato experimental) é mostrada na Figura 4.2. Nota-se que cada módulo de iluminação concentra o seu feixe luminoso em apenas uma mira de referência e, visando o melhor enquadramento do sistema estrutural na imagem, posiciona-se a câmera verticalmente.

Para movimentar a estrutura periodicamente, utiliza-se um excitador eletrodinâmico (shaker), modelo BK 4908, acoplado à primeira massa da estrutura. O sinal de entrada para o acionamento do shaker é criado por meio de um gerador de funções, que primeiramente envia o sinal a um amplificador de potência e em seguida ao shaker (Figura 4.3).

Nos experimentos, geram-se dois tipos de sinais de entrada para a excitação do

Figura 4.1: Viga engastada utilizada nos experimentos.

Figura 4.2: Aparato experimental para medição de vibração estrutural: 1) Módulos de iluminação, 2) Câmera na vertical.

sistema estrutural, sendo o primeiro sinal senoidal, com frequências de 2,02 Hz, 6,60 Hz e 14,20 Hz (Figura 4.4(a)), e o segundo um sinal quadrado (Figura 4.4(b)), que se forma pela soma dos harmônicos ímpares em fase de um seno com frequência fundamental de 3,18 Hz.

Com o intuito de verificar a viabilidade de utilizar o método proposto no sistema estrutural, comparam-se os resultados obtidos com medições realizadas por um ins-

Figura 4.3: Sistema de excitação da estrutura.

Figura 4.4: Sinais de excitação da estrutura.

trumento óptico conhecido como vibrômetro laser Doppler (CLV 800 da Polytec), que consiste em uma técnica bem estabelecida de medição das vibrações. Basicamente, o vibrômetro mede a componente da velocidade de vibração do ponto na direção do feixe de laser. O sinal analógico obtido é enviado para um módulo decodificador e posteriormente para a placa de aquisição National Instrument PCI 6229 (Figura 4.5). A vibração nos diversos pontos da estrutura é feita orientando-se o feixe de luz laser na direção de cada ponto, de forma independente (uma medição para cada ponto).

Antes do início das medições vibracionais, necessita-se calibrar a câmera fotográfica. Para isso, desenvolveu-se no programa CorelDRAW X4, um molde plano com dimensões de 440 x 150 mm, constituído de 574 quadrados de 10 mm cada. Imprimiu-se o molde no papel couchê adesivo de 150 g e com resolução de 2400 x 2400 dpi, para se evitar erros na calibração. Devido às deformações que o papel sofre quando movimentado,

Figura 4.5: Captura do sinal de vibração da estrutura pelo vibrômetro laser Doppler.

colou-se o molde plano em um placa de alumínio de 1 mm de espessura.

A calibração dos parâmetros da câmera é realizada com o auxílio do *Camera Calibration Toolbox for Matlab*, desenvolvido por Jean-Yves Bouguet (BOUGUET, 2010). O *toolbox* encontra os parâmetros da câmera por meio do processamento de uma sequência de imagens capturadas em diferentes orientações do molde planar, usando o método de calibração da câmera proposto por Zhang (2000) apresentado na Seção 3.5. A Figura 4.6, mostra algumas das 26 imagens utilizadas para a calibração da câmera no sistema estrutural. Os valores obtidos dos parâmetros extrínsecos são apresentados na Tabela 4.3 e os parâmetros intrínsecos na Tabela 4.4.

Figura 4.6: Imagens capturadas para a calibração da câmera em diferentes orientações do modelo de calibração.

Tabela 4.3: Parâmetros extrínsecos da câmera para o sistema estrutural.

Rotação	Translação (pixels)
$\mathbf{R} = \begin{bmatrix} -0,0116 & 0,9989 & 0,0451 \\ 0,9998 & 0,0120 & -0,0085 \\ -0,0091 & 0,0450 & -0,9989 \end{bmatrix}$	$\mathbf{t} = \begin{bmatrix} -40,9023 \\ -198,8350 \\ 591,2737 \end{bmatrix}$

Tabela 4.4: Parâmetros intrínsecos da câmera para o sistema estrutural.

α_x (pixels)	6072,6369
α_y (pixels)	6053,7533
u_0 (pixels)	1617,4991
v_0 (pixels)	2320,9077
γ (rad)	-0,0005
k_1 (mm ⁻²)	-0,0109
k_2 (mm ⁻⁴)	-0,1071

4.1.1 Resultados com Sinal de Excitação Senoidal

Inicialmente, apresentam-se os resultados experimentais das medições na frequência $f = 2,02$ Hz. As sequências das imagens capturadas pela câmera fotográfica e posterior análise dos pontos de referência, formam o movimento oscilatório da estrutura, como ilustrado na Figura 4.7, que representa o primeiro modo de vibrar da viga engastada.

A comparação dos resultados obtidos pela câmera fotográfica e pelo vibrômetro laser Doppler, em cada ponto de referência, são apresentados na Figura 4.8. Nos experimentos realizados com a técnica fotogramétrica, foram obtidas através do método da subamostragem 24 imagens para a reconstrução de apenas um período do sinal, sendo o período de amostragem $T = 0,495$ s e o incremento em cada período $\Delta s = 0,0206$ s. Nota-se que as Figuras 4.8(a) e 4.8(b) possuem as menores amplitudes de vibração e os maiores desvios nas medições. Este fato ocorre devido à resolução das imagens nesta aplicação, que é de aproximadamente 0,1 mm/pixel. Nas Figuras 4.8(c), 4.8(d) e 4.8(e), as amplitudes de vibração são superiores a 1 mm e, como pode ser observado, as medições com a câmera e o laser são praticamente idênticas.

Figura 4.7: Estrutura vibrando com frequência $f = 2,02$ Hz.

Para a construção da Figura 4.9, foram capturadas 14 imagens em sequência pelo método da subamostragem, sendo que, em cada imagem foram analisados cinco pontos de referência. O período de amostragem para esta medição foi de $T = 0,4545$ s e o valor do incremento em cada período $\Delta s = 0,0108$ s. Observa-se, que o movimento oscilatório da estrutura representa o segundo modo de vibração da viga engastada.

A Figura 4.10 apresenta os resultados comparativos entre os sinais obtidos pela câmera fotográfica e pelo vibrômetro laser Doppler em cada ponto de referência. Nota-se que a amplitude de vibração nas Figuras 4.10(a), 4.10(b) e 4.10(e) é de aproximadamente 0,5 mm e, sabendo-se que a resolução do sistema é de 0,1 mm/pixel, pequenas diferenças entre os sinais da câmera e o laser são observados. Com a redução da amplitude de vibração, aumentam-se significativamente as diferenças entre as medições dos dois sinais, sendo isto melhor ilustrado pela Figura 4.10(d), onde a amplitude de vibração é menor que 0,1 mm e a vibração pico a pico oscila entre dois pixels da imagem.

(a) vibração no ponto 1

(b) vibração no ponto 2

(c) vibração no ponto 3

(d) vibração no ponto 4

(e) vibração no ponto 5

Figura 4.8: Comparação dos resultados apresentados pela técnica fotogramétrica e vibrômetro laser Doppler na frequência $f = 2,02$ Hz (vibração estrutural).

Figura 4.9: Estrutura vibrando com frequência $f = 6,60$ Hz.

O último experimento realizado com o sinal de excitação senoidal foi com a frequência $f = 14,20$ Hz. A Figura 4.11 ilustra o movimento oscilatório da estrutura formado a partir de 10 imagens capturadas em sequência pela câmera fotográfica, com período de amostragem de $T = 0,3521$ s e valor incremental de cada período $\Delta s = 0,0070$ s. Observa-se, que o aumento da frequência de excitação não altera o modo de vibração do sistema, quando comparado com os experimentos da Figura 4.9. Neste caso, nota-se apenas uma maior amplitude do movimento, que ocorre devido a aproximação da frequência de ressonância do segundo modo de vibrar.

As Figuras 4.12(a), 4.12(d) e 4.12(e), apresentam amplitudes de vibração próximas a 0,5 mm e, como nos outros experimentos com a mesma amplitude, algumas diferenças entre as medições da câmera e do laser são notadas devido à baixa resolução do sistema de medição. Nas figuras 4.12(b) e 4.12(c), os deslocamentos medidos são maiores, aumentando-se assim a precisão da localização dos pontos de referência em milímetros.

(a) vibração no ponto 1

(b) vibração no ponto 2

(c) vibração no ponto 3

(d) vibração no ponto 4

(e) vibração no ponto 5

Figura 4.10: Comparação dos resultados apresentados pela técnica fotogramétrica e vibrômetro laser Doppler na frequência $f = 6,60$ Hz (vibração estrutural).

Figura 4.11: Estrutura vibrando com frequência $f = 14,2$ Hz.

Entretanto, nota-se que mesmo reduzindo a quantidade de imagens aqisitadas pelo método da subamostragem foi possível a reconstrução de um período do sinal.

4.1.2 Resultados com Sinal de Excitação Quadrado

Nos experimentos realizados com o sinal de excitação de onda quadrada, foram aqisitadas 60 imagens para a reconstrução de um período de vibração, sendo o período de amostragem $T = 0,6289$ s e o valor incremental em cada período $\Delta s = 0,0052$ s. A Figura 4.13 ilustra o movimento oscilatório da viga engastada e os cinco pontos de referência analisados.

Os sinais medidos pela câmera fotográfica e pelo vibrômetro laser Doppler, nos cinco pontos de referência, são apresentados na Figura 4.14. Devido à utilização do método da subamostragem para a captura das imagens e o fato do sinal periódico apresentar pequenas oscilações nas amplitudes em cada período, algumas discrepâncias

(a) vibração no ponto 1

(b) vibração no ponto 2

(c) vibração no ponto 3

(d) vibração no ponto 4

(e) vibração no ponto 5

Figura 4.12: Comparação dos resultados apresentados pela técnica fotogramétrica e vibrômetro laser Doppler na frequência $f = 14,2$ Hz (vibração estrutural).

Figura 4.13: Estrutura vibrando com sinal de excitação quadrado em frequência fundamental $f = 3,18$ Hz.

no posicionamento entre o sinal reconstruído pela câmera e o aquisitado pelo laser são observadas.

Os experimentos realizados na viga engastada, com sinais de excitação senoidal e quadrado, comprovaram a viabilidade em utilizar o método proposto para medição das vibrações nos sistemas estruturais. Como observado, foram aquisitados na excitação senoidal 24, 14 e 10 imagens para a reconstrução de um período de vibração, nas frequências de 2,02 Hz, 6,60 Hz e 14,20 Hz respectivamente. Nota-se, que a redução na quantidade das imagens capturadas não interfere na reconstrução de um período do sinal, fato que ocorre devido à simplicidade da forma da onda senoidal. Entretanto, quando aumenta-se a complexidade do sinal amostrado, como o caso do sinal de excitação quadrado, necessita-se de uma maior quantidade de pontos para a perfeita reconstrução de um período de vibração do sistema (neste caso, 60 pontos).

Verifica-se também nos experimentos que, devido à resolução do sistema de medi-

(a) vibração no ponto 1

(b) vibração no ponto 2

(c) vibração no ponto 3

(d) vibração no ponto 4

(e) vibração no ponto 5

Figura 4.14: Comparação dos resultados apresentados pela técnica fotogramétrica e vibrômetro laser Doppler com sinal quadrado de excitação

ção ser fixa em aproximadamente 0,1 mm/pixel, os resultados obtidos em amplitudes inferiores 0,5 mm apresentam desvios no posicionamento quando comparados com as medições realizadas pelo vibrômetro laser Doppler.

4.2 Medição da Órbita de Eixos

A fim de se verificar a viabilidade em se utilizar o método proposto de medição das vibrações em sistemas rotativos, realizam-se experimentos em uma bancada de testes posicionada sobre uma plataforma inercial. O sistema testado (Figura 4.15) é basicamente composto por um eixo de aço carbono, de 20 mm de diâmetro e 1020 mm de comprimento, suportado por mancais de rolamento autocompensadores de esferas, sendo que em uma das extremidades do eixo acopla-se um motor elétrico trifásico de 0,5 cv, por meio de uma junta universal, cujo controle da frequência de rotação ocorre através de um inversor de frequências. No centro do eixo foram fixados 5 discos rígidos de aço carbono com massa de 3 kg cada, de forma a se obter um sistema do tipo rotor de Laval.

Figura 4.15: Bancada de testes do sistema rotativo: 1) Mancais de rolamento, 2) Eixo de aço carbono, 3) Discos de aço carbono, 4) Motor elétrico.

Os módulos de iluminação e a câmera fotográfica foram posicionados conforme mostrado na Figura 4.16. Como o intuito de aumentar a intensidade luminosa na mira de referência, direcionam-se os cinco módulos de iluminação para um único ponto. E o fato de se utilizar a lente na máxima distância focal (200 mm), restringe-se a localização da câmera em aproximadamente 1 metro do ponto a ser medido.

Figura 4.16: Aparato experimental para a medição da órbita do eixo: 1) Módulos de iluminação, 2) Câmera fotográfica.

Figura 4.17: Posicionamento dos sensores de proximidade indutivo no sistema rotativo.

Os resultados experimentais obtidos pelo método proposto foram comparados com os resultados obtidos por dois sensores de proximidade indutivo (Figura 4.17), montados defasados de 90° , que medem o deslocamento do eixo nas direções vertical e horizontal. O sinal analógico capturado pelos sensores são adquiridos pela placa da National Instrument PCI 6229 para posterior análise no computador.

Para identificar o valor da frequência de ressonância do sistema rotativo, realizaram-se testes de partida do motor (*run up*), que basicamente consistiram em aumentar uniformemente a velocidade angular do motor até que o mesmo atingisse a máxima velocidade de rotação. A Figura 4.18 mostra a amplitude de vibração do eixo nas direções X (horizontal) e Y (vertical) e a localização das frequências de ressonância

Figura 4.18: Resposta vibratória nas direções X e Y e localização das frequências de ressonância do sistema rotativo.

reais experimentais. Os dados foram obtidos a partir de medições feitas com sensores de proximidade indutivos montados na bancada de testes.

Os experimentos foram realizados em cinco frequências de rotação: 5 Hz (300 rpm), 10 Hz (600 rpm), 14 Hz (840 rpm), 16 Hz (960 rpm) e 16,5 Hz (990 rpm). Entretanto, devido ao escorregamento do motor, os valores marcados no display do inversor de frequências não representam as frequências de rotação efetivas. Sendo assim, com o auxílio do estroboscópio digital e do sistema de controle descrito na Seção 3.3, encontram-se os verdadeiros valores de cada frequência de rotação do sistema, como apresentado na Tabela 4.5.

Tabela 4.5: Frequências de rotação reais do sistema.

$f_{inversor}$ (Hz)	f_{real} (Hz)
5	4,74
10	9,72
14	13,72
16	15,73
16,5	16,22

O modelo plano utilizado para a calibração da câmera fotográfica no sistema rotativo foi brevemente descrito na Seção 3.5 e, basicamente, é composto por 108 quadrados de 5 milímetros cada com um rasgo central para o encaixe no eixo. Visando minimizar os erros na calibração, o modelo plano foi projetado em um programa de desenho vetorial

e impresso na resolução de 2400 x 2400 dpi.

A Figura 4.19 mostra algumas das 33 imagens capturas para a calibração da câmera na medição do sistema rotativo em diferentes orientações. Os parâmetros intrínsecos e extrínsecos da câmera também foram encontrados por meio do *Camera Calibration Toolbox for Matlab* e são especificados nas Tabelas 4.6 e 4.7.

Figura 4.19: Imagens capturadas para a calibração da câmera em diferentes orientações do modelo de calibração.

Tabela 4.6: Parâmetros intrínsecos da câmera para o sistema rotativo.

α_x (pixels)	53213,6459
α_y (pixels)	52910,6746
u_0 (pixels)	2211,2014
v_0 (pixels)	1774,7372
γ (rad)	-0,0027
k_1 (mm ⁻²)	2,8831
k_2 (mm ⁻⁴)	2458,5346

A frequência de rotação de 4,74 Hz (284 rpm) foi a primeira analisada nas medições das vibrações do eixo rotativo. As Figuras 4.20 e 4.21 apresentam as comparações dos resultados obtidos das medições das vibrações com a câmera fotográfica e com o sensor de proximidade indutivo. Observa-se que, neste caso, dois períodos foram

Tabela 4.7: Parâmetros extrínsecos da câmera para o sistema rotativo.

Rotação	Translação (pixels)
$\mathbf{R} = \begin{bmatrix} 0,0133 & 0,9992 & -0,0370 \\ 0,9855 & -0,0068 & 0,1695 \\ 0,1691 & -0,0387 & -0,9848 \end{bmatrix}$	$\mathbf{t} = \begin{bmatrix} -21,3702 \\ -19,9634 \\ 1160,0016 \end{bmatrix}$

Figura 4.20: Comparação entre as medições da câmera e do sensor de proximidade na frequência de rotação de 4,74 Hz.

Figura 4.21: Comparação entre as medições da câmera e do sensor de proximidade na frequência de rotação de 4,74 Hz - Órbita do eixo.

reconstruídos, sendo que cada período possui 18 pontos amostrados, como período de amostragem $T = 0,4219$ s e valor incremental $\Delta s = 0,0117$ s. As amplitudes das vibrações nas direções X e Y são de aproximadamente 0,2 mm (pico a pico). Nota-se que o sinal reconstruído apresenta pequenas variações em relação ao sinal medido pelo sensor de proximidade. Este fato ocorre, principalmente, devido à baixa resolução do sistema de medição, que é de 0,0217 mm/pixel.

As Figuras 4.22 e 4.23 mostram os resultados experimentais na frequência de rotação de 9,72 Hz (583 rpm). Para a reconstrução de um período foram capturados 18 imagens, sendo o período de amostragem $T = 0,4116$ s e o valor incremental em cada período $\Delta s = 0,0057$ s. Observa-se que a amplitude de vibração na direção X (Figura 4.22(a)) de aproximadamente 0,2 mm (pico a pico), assemelhasse aos valores das medições observadas nas Figuras 4.20(a) e 4.20(b), onde são notadas pequenas variações entre o sinal reconstruído e o medido pelo sensor de proximidade. Nota-se na Figura 4.22(b), que o pequeno aumento da amplitude de vibração para 0,3 mm (pico a pico) diminui significativamente os erros entre as medições da câmera e do sensor.

Os resultados das medições realizadas na frequência de rotação de 13,72 Hz (823 rpm) são mostradas nas Figuras 4.24 e 4.25. Para a reconstrução de um período foram capturados 13 imagens, sendo o período de amostragem $T = 0,3645$ s e o valor incremental em cada período $\Delta s = 0,0056$ s. Nota-se que, na Figura 4.24(b), o aumento da amplitude de vibração para 0,4 mm (pico a pico) melhora significativamente a correlação entre as medições realizadas pela câmera fotográfica e pelo sensor de proximidade. Entretanto, na Figura 4.24(a) as amplitudes de vibração são de aproximadamente 0,3 mm (pico a pico) e, mesmo assim, apresentam pequenos desvios entre as medições. Neste caso, os erros ocorrem devido a diferenças nas formas de onda em cada período adquirido pela técnica da subamostragem.

As Figuras 4.26 e 4.27 mostram os resultados experimentais na frequência de rotação de 15,73 Hz (943 rpm). Para a reconstrução de um período foram capturados 18 imagens, sendo o período de amostragem $T = 0,3817$ s e o valor incremental em cada período $\Delta s = 0,0035$ s. Observa-se que o aumento da amplitude de vibração nas direções X e Y reduz os erros comparativos entre as medições da câmera e do sensor de proximidade.

As medições com frequência de rotação de 16,22 Hz (990 rpm), foram as últimas

Figura 4.22: Comparação entre as medições da câmera e sensor de proximidade na frequência de rotação de 9,72 Hz.

Figura 4.23: Comparação entre as medições da câmera e sensor de proximidade na frequência de rotação de 9,72 Hz - Órbita do eixo.

Figura 4.24: Comparação entre as medições da câmera e sensor de proximidade na frequência de rotação de 13,72 Hz.

Figura 4.25: Comparação entre as medições da câmera e do sensor de proximidade na frequência de rotação de 13,72 Hz - Órbita do eixo.

Figura 4.26: Comparação entre as medições da câmera e do sensor de proximidade na frequência de rotação de 15,73 Hz.

Figura 4.27: Comparação entre as medições da câmera e sensor de proximidade na frequência de rotação de 15,73 Hz - Órbita do eixo.

realizadas no sistema rotativo e são mostradas nas Figuras 4.28 e 4.29. Realiza-se a reconstrução de um período do sinal por meio de 21 imagens aquisitadas pela câmera fotográfica, sendo o período de amostragem da câmera $T = 0,3700$ s e o valor incremental em cada período $\Delta s = 0,0029$ s. Observa-se na Figura 4.28(b) a perfeita correlação entre o sinal reconstruído pelas imagens aquisitadas pela câmera e o sinal medido pelo sensor de proximidade. Este fato se deve à elevada amplitude de vibração, que é de aproximadamente 1,2 mm (pico a pico), devido à proximidade com a ressonância do sistema.

Figura 4.28: Comparação entre as medições da câmera e do sensor de proximidade na frequência de rotação de 16,22 Hz.

Figura 4.29: Comparação entre as medições da câmera e sensor de proximidade na frequência de rotação de 16,22 Hz - Órbita do eixo.

Nos experimentos realizados no sistema rotativo, verificou-se que os erros causados pelo nível de resolução da imagem ocorrem principalmente em pequenas amplitudes de vibração (amplitudes menores do que 0,2 mm pico a pico). Observa-se que, nestes casos, a simples alteração da posição de um pixel em relação à sua verdadeira localização aumenta significativamente o desvio do ponto reconstruído quando comparado com as medições realizadas pelo sensor de proximidade.

O fato de se utilizar a técnica da subamostragem para a aquisição das imagens requer que as formas de onda sejam idênticas durante todo o período de aquisição. No

entanto, devido às pequenas variações na frequência do sistema de rotação e aos ruídos causados pela rede elétrica, as formas de onda em cada período não são exatamente iguais, dificultando a perfeita reconstrução do sinal medido.

De qualquer forma, os resultados experimentais apresentados pelo método fotogramétrico foram satisfatórios mesmo para as pequenas amplitudes de vibração observadas nas frequências de 4,74 hz (0,2 mm pico a pico na direção X e 0,25 mm pico a pico na direção Y) e de 9,72 Hz (0,25 mm pico a pico na direção X). Trata-se, portanto, de um avanço em relação às técnicas fotogramétricas encontradas na literatura, as quais permitem medir apenas amplitudes de vibração da ordem de dezenas de milímetros. Além disso, é importante lembrar que se trata de um sistema de medição de baixo custo.

Capítulo 5

Análise Modal Operacional

Este capítulo apresenta os conceitos da técnica de análise modal operacional e os resultados experimentais realizados na viga engastada aplicando esta técnica em conjunto com o método de medição fotogramétrico.

5.1 Fundamentação Teórica

A Análise Modal Operacional (AMO) é um procedimento que extrai os parâmetros modais estruturais utilizando-se como sinal de entrada a própria excitação operacional para a medição da resposta do sistema. Assim, não é necessário conhecer a excitação do sistema (MOHANTY; RIXEN, 2004).

Desde o início da década de 1990, a análise modal operacional (AMO) vem se destacando nas diversas áreas da engenharia, sendo aplicada em pontes, plataformas *off-shore*, rotores, aeronaves, edifícios e sistemas mecânicos em geral. As principais vantagens em utilizar a AMO são:

- o baixo custo e a facilidade de utilização, não necessitando de equipamentos de excitação elaborados;
- a possibilidade de obter características dinâmicas do sistema completo nos pontos mais representativos;
- a possibilidade de usar a identificação modal operacional também para a análise de vibrações e monitoramento da saúde estrutural do sistema.

Sabendo-se que os métodos tradicionais de identificação dos parâmetros modais são limitados a testes laboratoriais, isto é, utilizam força de excitação artificial, controlada e medida, torna-se interessante a extração de modelos modais apenas das informações da resposta operacional (RICHARDSON; SCHWARZ, 2003). Sendo assim, realizaram-se experimentos com o método de medição fotogramétrico proposto em um sistema estrutural, a fim de obter os dados de resposta do sistema e utilizá-los na análise modal operacional, de forma a se obter as características dinâmicas do sistema (frequências naturais e modos de vibrar associados).

5.2 Resultados Experimentais

Os experimentos foram realizados com os mesmos equipamentos, estrutura e configurações no posicionamento descritos na seção 4.1. A Figura 5.1 apresenta a visão geral dos equipamentos utilizados para verificar a viabilidade em se utilizar o método proposto de medição na análise modal operacional.

Figura 5.1: Aparato experimental utilizado na análise modal operacional da estrutura.

Visando simular o movimento operacional da estrutura periodicamente, utiliza-se como excitação de entrada o sinal proposto por Schroeder (1970), que possui como principais características pequena amplitude pico a pico e baixa autocorrelação. O sinal de Schroeder $f(t)$ é definido pela equação:

$$f(t) = \sum_{k=1}^N \left(\frac{p_k}{2} \right)^{\frac{1}{2}} \cos \left(\frac{2\pi kt}{T} + \theta_k \right), \quad k = 1, 2, \dots, N. \quad (5.1)$$

onde T é o período do sinal, p_k é o peso relativo do k -ésimo harmônico ($\sum_{k=1}^N p_k = 1$) e θ_k é o ângulo de fase, que no caso é dado pela equação:

$$\theta_k = \theta_1 - \frac{\pi k^2}{N} \quad (5.2)$$

A Figura 5.2 apresenta o sinal chirp de excitação formado por 30 harmônicos ($N = 30$), com período $T = 1,5$ s, o ângulo de fase inicial $\theta_1 = -(\frac{\pi}{2})$ e máxima componente em frequência de 18,67 Hz. A denominação de sinal chirp deve-se ao aumento da frequência do sinal ao longo do tempo.

Figura 5.2: Sinal periódico gerado para excitar o sistema estrutural (sinal de Schroeder).

Para a calibração da câmera, capturaram-se 33 imagens em diferentes orientações, como mostrado na Figura 5.3. Os parâmetros intrínsecos e extrínsecos da câmera foram encontrados com o auxílio do *Camera Calibration Toolbox for Matlab* e apresentam-se escritos nas Tabelas 5.1 e 5.2.

A Figura 5.4 mostra os pontos de interesse utilizados como referência para as me-

Figura 5.3: Algumas das imagens capturadas para a calibração da câmera em diferentes orientações do modelo de calibração.

Tabela 5.1: Parâmetros intrínsecos da câmera para o sistema estrutural na análise modal operacional.

α_x (pixels)	5549,1889
α_y (pixels)	5533,9532
u_0 (pixels)	1588,5625
v_0 (pixels)	2325,8045
γ (rad)	-0,0010
k_1 (mm ⁻²)	-0,0300
k_2 (mm ⁻⁴)	-0,08466

Tabela 5.2: Parâmetros extrínsecos da câmera para o sistema estrutural na análise modal operacional.

Rotação	Translação (pixels)
$\mathbf{R} = \begin{bmatrix} -0,0381 & 0,9962 & 0,0774 \\ 0,9991 & 0,0393 & -0,0139 \\ -0,0169 & 0,0768 & -0,9968 \end{bmatrix}$	$\mathbf{t} = \begin{bmatrix} -56,9705 \\ -205,7908 \\ 540,6514 \end{bmatrix}$

dições da viga engastada. O fato de se utilizar um sinal chirp com inúmeras oscilações para a excitação da estrutura aumenta a complexidade da forma de onda do sinal de resposta do sistema. Sendo assim, aquisitam-se 102 imagens para a reconstrução de

Figura 5.4: Localização dos pontos utilizados nos experimentos de Análise Modal Operacional.

apenas um período do sinal pelo método da subamostragem. O período de amostragem da câmera utilizado neste experimento foi $T = 1,5$ s e o valor incremental em cada período $\Delta s = 0,0147$ s.

Com o intuito de validar o método proposto de medição, comparam-se os resultados obtidos com a câmera fotográfica com as medições realizadas pelo vibrômetro laser Doppler, como apresentado nas Figuras 5.5 a 5.8. Notam-se alguns erros no posicionamento entre as medições da câmera e do laser, que ocorrem principalmente devido às formas de onda não serem exatamente idênticas nos períodos aquisitados.

A partir das respostas no tempo encontradas nas medições do sistema estrutural, pode-se construir a matriz densidade espectral $\mathbf{A}$, dada por:

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} E_{11} & E_{12} & \cdots & E_{1N} \\ E_{21} & E_{22} & \cdots & E_{2N} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ E_{N1} & E_{N2} & \cdots & E_{NN} \end{bmatrix} \quad (5.3)$$

na qual E_{ii} é o autoespectro do i -ésimo sinal e E_{ij} é o espectro cruzado entre o i -ésimo e o j -ésimo sinais.

Para facilitar a construção da matriz densidade espectral $\mathbf{A}$ utilizam-se as funções pré definidas `pwelch` e `cpsd` da *toolbox* de processamento de sinais do MATLAB® que,

Figura 5.5: Comparação entre as medições da câmera e do vibrômetro laser Doppler no ponto 1 da estrutura.

Figura 5.6: Comparação entre as medições da câmera e do vibrômetro laser Doppler no ponto 2 da estrutura.

Figura 5.7: Comparação entre as medições da câmera e do vibrômetro laser Doppler no ponto 3 da estrutura.

Figura 5.8: Comparação entre as medições da câmera e do vibrômetro laser Doppler no ponto 4 da estrutura.

através do periodograma de Welch calculam o autoespectro e o espectro cruzado dos sinais, respectivamente. Definindo-se a matriz densidade espectral, utiliza-se a técnica de Decomposição no Domínio da Frequência (FDD), que identifica os parâmetros modais utilizando apenas as respostas no domínio da frequência (BRINCKER; ZHANG; ANDERSEN, 2000). De acordo com Brincker, Ventura e Andersen (2001), a técnica FDD decompõe a matriz de densidade espectral em valores e vetores singulares utilizando a decomposição em valores singulares (SVD). A equação básica do SVD é apresentada por:

$$\mathbf{A} = \mathbf{U} \mathbf{S} \mathbf{V}^H \quad (5.4)$$

onde a matriz $\mathbf{A} \in \mathbb{C}^{m \times n}$ é a matriz densidade espectral dos sinais medidos, as matrizes $\mathbf{U} \in \mathbb{R}^{m \times m}$ e $\mathbf{V} \in \mathbb{R}^{n \times n}$ são ortogonais unitárias, e $\mathbf{S}$ é a matriz diagonal de elementos $s_1 \geq s_2 \geq \dots \geq s_p \geq 0$ com $p = \min(m, n)$, sendo chamados de valores singulares da matriz $\mathbf{A}$ (MAIA, 1991). O sobre-escrito H indica uma operação transposta Hermitiana.

Expandindo-se a Equação (5.4) obtém-se:

$$\mathbf{A} = [\{u_1\} \{u_2\} \dots \{u_m\}] \begin{bmatrix} s_1 & & & \\ & s_2 & & \\ & & \ddots & \\ & & & s_p \end{bmatrix} [\{v_1\}^H \{v_2\}^H \dots \{v_n\}^H] \quad (5.5)$$

onde $\{u_1\} \{u_2\} \dots \{u_m\}$ são autovetores de $\mathbf{A}\mathbf{A}^H$, $\{v_1\}^H \{v_2\}^H \dots \{v_n\}^H$ são autovetores de $\mathbf{A}^H \mathbf{A}$ e $s_1^2, s_2^2 \dots s_p^2$ são autovalores não nulos de $\mathbf{A}^H \mathbf{A}$ e $\mathbf{A}\mathbf{A}^H$.

A decomposição da matriz $\mathbf{A}$ em valores singulares pode ser feita através do comando `svd` do programa MATLAB®. A Tabela 5.3 apresenta os valores das frequências naturais do sistema estrutural obtidas pelo método SVD nas medições realizadas com a câmera fotográfica e com o vibrômetro laser Doppler, sendo que ω_1 e ω_2 representam respectivamente as frequências naturais associadas ao primeiro e ao segundo modo de vibrar, e foram extraídas da diagonal principal da matriz $\mathbf{S}$.

Tabela 5.3: Frequências naturais do sistema estrutural.

	ω_1 (Hz)	ω_2 (Hz)
Câmera	2,00	18,67
Laser	2,67	17,33

Sabendo-se a localização das frequências naturais na matriz $\mathbf{S}$, é possível encontrar os deslocamentos modais dos quatro pontos medidos na estrutura. A Tabela 5.4 apresenta os resultados para os dois primeiros modos de vibração, obtidos com as medições realizadas com a câmera fotográfica e com o vibrômetro laser Doppler. As Figuras 5.9 e 5.10 ilustram o primeiro e segundo modos de vibrar da engastada, respectivamente.

Tabela 5.4: Comparativo dos dois primeiros modos de vibração do sistema estrutural.

	Pontos	Câmera [mm]	Laser [mm]	Erro relativo (%)
1º modo	1	0,212	0,089	136,12
	2	0,449	0,348	28,98
	3	0,710	0,658	7,86
	4	1,000	1,000	-
2º modo	1	1,000	1,000	-
	2	1,431	1,469	2,67
	3	0,780	0,797	2,13
	4	-0,784	-0,808	3,01

A elevada diferença observada nos pontos 1 e 2 do primeiro modo de vibrar ocorre principalmente devido à resolução do sistema de medição com a câmera ser de aproximadamente 0,1 mm/pixel, dificultando a real localização do ponto medido (estes pontos

Figura 5.9: Comparativo do primeiro modo de vibrar da viga engastada.

Figura 5.10: Comparativo do segundo modo de vibrar da viga engastada.

apresentam baixa amplitude de vibração no primeiro modo de vibrar). Entretanto, no segundo modo de vibrar, os pontos possuem maiores amplitudes de deslocamento e, conseqüentemente, a diferença entre as duas medições é menor. Portanto, os resultados experimentais obtidos demonstraram a viabilidade em se utilizar a técnica de medição fotogramétrica para a análise modal operacional. Para isto, a excitação operacional do sistema deve ser periódica, com frequência fundamental conhecida.

Capítulo 6

Conclusões

Neste trabalho, um método de medição multi-pontos sem contato e de baixo custo foi desenvolvido para medir as vibrações em sistemas estruturais e rotativos. Basicamente, o método utiliza os princípios da fotogrametria em conjunto com a técnica da subamostragem para a aquisição e reconstrução do sinal de resposta dos sistemas. Os testes experimentais foram realizados em uma viga engastada, que excitada por um shaker eletrodinâmico simula o movimento periódico de uma estrutura, e em um eixo rotativo montado em um bancada de testes sujeito a força de desbalanço. Além disso, o método também foi aplicado na análise modal operacional, que a partir apenas do sinal de resposta do sistema consegue extrair as informações modais da estrutura.

De acordo com os resultados obtidos, pode-se concluir que o método de medição proposto neste trabalho funciona com precisão, mesmo apresentando algumas limitações, tais como:

- tempo mínimo de abertura do obturador da câmera em $1/4000$ segundos, que limita as frequências das medições;
- baixa resolução da câmera, que limita as amplitudes de vibração das medições;
- utilização de poucos módulos de iluminação, que prejudicam a nitidez das imagens capturadas;
- e a necessidade de um sinal de excitação periódico principalmente na análise modal operacional.

6.1 Trabalhos futuros

A técnica de medição apresentada neste trabalho pode ser aperfeiçoada, sendo assim sugerem-se os seguintes pontos como trabalhos futuros:

- utilizar uma câmera fotográfica com resolução superior a 14,2 megapixels, o que aumentaria a resolução do sistema de medição, e com tempo de abertura do obturador inferior a 1/4000 segundos, para a redução dos borrões de movimento;
- desenvolver um sistema que sincronize os disparos da câmera fotográfica com um *flash* em pequenos intervalos de tempo, para melhorar a nitidez das imagens adquiridas;
- realizar medições 3D com o emprego de pelo menos duas câmeras fotográficas com disparos e iluminação por flash em sincronismo.

Referências Bibliográficas

ABRAMOWITZ, M.; DAVIDSON, M. W. **Color Temperature**. 2012. Disponível em: <<http://www.olympusmicro.com/primer/lightandcolor/colortemp.html>>.

ATKINSON, K. B. **Close Range Photogrammetry and Machine Vision**. [S.l.]: Whittles Publishing, 1996.

BOUGUET, J.-Y. **Camera Calibration Toolbox for Matlab**. 2010. Disponível em: <http://www.vision.caltech.edu/bouguetj/calib_doc/index.html>.

BRINCKER, R.; VENTURA, C. E.; ANDERSEN, P. Damping estimation by frequency domain decomposition. In: **Proceedings of the 19th International Modal Analysis Conference**. [S.l.: s.n.], 2001. p. 698–703.

BRINCKER, R.; ZHANG, L.; ANDERSEN, P. Modal identification from ambient responses using frequency domain decomposition. In: **Proceedings of the 18th International Modal Analysis Conference**. [S.l.: s.n.], 2000. p. 625–630.

BUCKBERRY, C.; REEVES, M.; MOORE, A.; HAND, D.; BARTON, J.; JONES, J. The application of high-speed TV-holography to time-resolved vibration measurements. **Optics and Lasers in Engineering**, v. 32, n. 4, p. 387–394, August 2000.

CHANG, C.; JI, Y. Flexible videogrammetric technique for three-dimensional structural vibration measurement. **Journal of Engineering Mechanics**, v. 133, n. 6, p. 656–664, June 2007.

CHANG, C.; XIAO. Three-dimensional structural translation and rotation measurement using monocular videogrammetry. **Journal of Engineering Mechanics**, v. 136, n. 7, p. 840–848, July 2010.

- CHOI, H.; GOMES, A. V.; CHATTERJEE, A. Signal acquisition of high-speed periodic signals using incoherent sub-sampling and back-end signal reconstruction algorithms. **IEEE Transactions on Very Large Scale Integration (VLSI) Systems**, v. 19, n. 7, p. 1125–1135, July 2011.
- CHUNG, H.-C.; LIANG, J.; KUSHIYAMA, S.; SHINOZUKA, M. Digital image processing for non-linear system identification. **International Journal of Non-Linear Mechanics**, v. 39, n. 5, p. 691–707, July 2004.
- FAUGERAS, O. **Three-dimensional computer vision: a geometric viewpoint**. Cambridge, MA, USA: MIT Press, 1993.
- FAUGERAS, O. D.; LUONG, Q. T.; MAYBANK, S. J. Camera self-calibration: Theory and experiments. In: **ECCV '92: Proceedings of the Second European Conference on Computer Vision**. 321–334: Springer-Verlag, 1992. p. 321–334.
- FAUGERAS, O. D.; TOSCANI, G. The calibration problem for stereo. In: **Proceedings of the International Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)**. Miami Beach, Florida: [s.n.], 1986. p. 15–20.
- FERRER, B.; ESPINOSA, J.; PÉREZ, J.; IVORRA, S.; MAS, D. Optical scanning for structural vibration measurement. **Research in Nondestructive Evaluation**, v. 22, n. 2, p. 61–75, July 2011.
- FILHO, L. C. T. C.; BRITO, J. L. N. e S. **Fotogrametria Digital**. [S.l.]: Editora da Universidade do Estado do Rio de Janeiro, 2007.
- FINK, R.; YEARY, M.; BURNS, M.; GUIDRY, D. A DSP-based technique for high-speed A/D conversion to generate coherently sampled sequences. **IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement**, v. 52, n. 3, p. 950–958, June 2003.
- HELFRICK, M. N.; PINGLE, P.; NIEZRECKI, C.; AVITABILE, P. Optical non-contacting vibration measurement of rotating turbine blades. In: **Proceedings of the IMAC XXVII**. Orlando, Florida: [s.n.], 2009. p. 1–5.
- HELFRICK, M. N.; PINGLE, P.; NIEZRECKI, C.; AVITABILE, P. Using full-field vibration measurement techniques for damage detection. In: **Proceedings of the IMAC XXVII**. Orlando, Florida: [s.n.], 2009. p. 1–11.

JEON, H.-S.; CHOI, Y.-C.; PARK, J.-H.; PARK, J. W. Multi-point measurement of structural vibration using pattern recognition from camera image. **Nuclear Engineering and Technology**, v. 42, n. 6, p. 704–711, December 2010.

KHAN, A.; STANBRIDGE, A.; EWINS, D. Detecting damage in vibrating structures with a scanning LDV. **Optics and Lasers in Engineering**, v. 32, n. 6, p. 583–592, December 2000.

KUMAR, R.; SHAKHER, C. Application of digital speckle pattern interferometry and wavelet transform in measurement of transverse vibrations in square plate. **Optics and Lasers in Engineering**, v. 42, n. 5, p. 585–602, November 2004.

LEE, H.; RHEE, H. 3-d measurement of structural vibration using digital close-range photogrammetry. **Sensors and Actuators A: Physical**, v. 196, p. 63–69, July 2013.

LINDER, W. **Digital Photogrammetry A Practical Course**. [S.l.]: Springer, 2009.

LIU, T.; BURNER, A. W.; JONES, T. W.; BARROWS, D. A. Photogrammetric techniques for aerospace applications. **Progress in Aerospace Sciences**, v. 54, p. 1–58, October 2012.

LÓPEZ, C. P.; SANTOYO, F. M.; VERA, R. R.; FUNES-GALLANZI, M. Separation of vibration fringe data from rotating object fringes using pulsed ESPI. **Optics and Lasers in Engineering**, v. 38, n. 3-4, p. 145–152, September-October 2002.

LUHMANN, T.; ROBSON, S.; KYLE, S.; HARLEY, I. **Close Range Photogrammetry Principles, Methods and Applications**. [S.l.]: Whittles Publishing, 2006.

MAAS, H.-G. High-speed solid state camera systems for digital photogrammetry. In: **Proceedings of XVIIth ISPRS Congress, Technical Commission V: Close-Range Photogrammetry and Machine Vision**. Washington, D.C., USA: [s.n.], 1992. p. 482–485.

MAIA, N. M. M. Fundamentals of singular value decomposition. In: **Proceedings of the 9th International Modal Analysis Conference**. [S.l.: s.n.], 1991. p. 1515–1521.

MAYBANK, S. J.; FAUGERAS, O. D. A theory of self-calibration of a moving camera. **International Journal of Computer Vision**, v. 8, n. 2, p. 123–151, 1992.

MIRZA, S.; SINGH, P.; KUMAR, R.; VYAS, A. L.; SHAKHE, C. Measurement of transverse vibrations/visualization of mode shapes in square plate by using digital speckle pattern interferometry and wavelet transform. **Optics and Lasers in Engineering**, v. 44, n. 1, p. 41–55, January 2006.

MOHANTY, P.; RIXEN, D. A modified ibrahim time domain algorithm for operational modal analysis including harmonic excitation. **Journal of Sound and Vibration**, v. 275, p. 375–390, 2004.

MORÉ, J. J. The levenberg-marquardt algorithm: Implementation and theory. In: WATSON, G. A. (Ed.). **Numerical Analysis**. Berlin: Springer, 1977. v. 630, p. 105–116.

NIEDERÖST, M.; MASS, H. G. Automatic deformation deasurement with a digital still video camera. In: **Optical 3D measurement techniques IV**. Zurich, Wichmann, Karlsruhe, Germany: [s.n.], 1997. p. 266–271.

NYQUIST, H. Certain topics in telegraph transmission theory. **Transactions A. I. E. E.**, v. 47, p. 617–644, 1928.

OLASZEK, P. Investigation of the dynamic characteristic of bridge structures using a computer vision method. **Measurement**, v. 25, n. 3, p. 227–236, April 1999.

OZBEK, M.; RIXEN, D. J.; ERNE, O.; SANOW, G. Feasibility of monitoring large wind turbines using photogrammetry. **Energy**, v. 35, n. 12, p. 4802–4811, December 2010.

PATSIAS, S.; STASZEWSKI, W. Damage detection using optical measurements and wavelets. **Structural Health Monitoring**, v. 1, n. 1, p. 5–22, July 2002.

RADER, C. M. Recovery of undersampled periodic waveforms. **IEEE Transactions on Acoustics, Speech and Signal Processing**, ASSP-25, n. 3, p. 243–249, June 1977.

RAO, S. S. **Vibration of Continuous Systems**. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2007.

- RASTOGI, P. K. **Digital Speckle Pattern Interferometry & Related Techniques**. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2001.
- RICHARDSON, M.; SCHWARZ, B. Modal parameter estimation from operating data. **Sound and Vibration**, p. 28–36, 2003.
- RYALL, T. G.; FRASER, C. S. Determination of structural modes of vibration using digital photogrammetry. **Journal of Aircraft**, v. 39, n. 1, p. 114–119, January-February 2002.
- SCHROEDER, M. R. Synthesis of low-peak-factor signals and binary sequences of low auto-correlation. **IEEE Trans. on Information Theory**, IT-16, p. 85–89, 1970.
- SHANNON, C. E. Communication in the presence of noise. In: **PROCEEDINGS OF THE IRE**. [S.l.: s.n.], 1949. v. 37, n. 1, p. 10–21.
- T&S EQUIPAMENTOS ELETRÔNICOS. **Manual de Instruções MA-TS-1100**. 2005. Disponível em: <<http://www.tesequipamentos.com.br/arq/ma-ts-1100.pdf>>.
- WARREN, C.; PINGLE, P.; NIEZRECKI, C.; AVITABILE, P. Comparison of image based, laser, and accelerometer measurements. In: **Proceedings of the IMAC XXVIII**. Jacksonville, Florida: [s.n.], 2010. p. 1–7.
- WHITEMAN, T.; LICHTI, D. D.; CHANDLER, I. Measurement of deflections in concrete beams by close-range digital photogrammetry. In: **Proceedings of the Symposium on Geospatial Theory, Processing and Applications, ISPRS Commission IV**. Ottawa, Canada: [s.n.], 2002.
- YOSHIDA, J.; ABE, M.; KUMANO, S.; FUJINO, Y. Construction of a measurement system for the dynamic behaviors of membrane by using image processing. In: **Proceedings of the 1st International Conference on Textile Composites and Inflatable Structures**. Barcelona, Spain: [s.n.], 2003. p. 1–10.
- ZHANG, H.; SCHULZ, M. J.; FERGUSON, F. Structural health monitoring using transmittance functions. **Mechanical S**, v. 13, p. 765–787, 1999.
- ZHANG, Z. A flexible new technique for camera calibration. **IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence**, v. 22, p. 1330–1334, 2000.

Apêndice A

Programa em Assembly do controle da câmera

```
;  
; Configuracao da CPU  
; (PIC: 16F84, cristal oscillator,  
; watchdog timer off, power-up timer on)  
;  
  
processor 16f628A  
include <p16f628A.inc>  
__config _HS_OSC & _WDT_OFF & _PWRTE_ON & _LVP_OFF & _BODEN_OFF ...  
        &_MCLRE_OFF  
  
;  
;Definicao das constantes  
;  
;  
;Formula p/ o calculo da constante SPBRG  
;spbrgCte = freqCristal/(64*baudRate) - 1 se BRGH=0 ( )  
;spbrgCte = freqCristal/(16*baudRate) - 1 se BRGH=1 (x)  
  
#define spbrgCte    D'129' ;9600 p/ xtal 20MHz  
  
;  
; Declaracao das variaveis
```

```

;-----
        CBLOCK    0x20
        STATUS_TEMP, W_TEMP
        cnt1,cnt2 ,byte, cntTimer,auxTmrH,auxTmrL
        cntDado,cntCam
        ENDC

;-----
; Programa
;-----

        org      0x00
        goto     main
        org      0x04
        goto     interrupt

;-----
;subrotina de configuracoes iniciais do PIC
;-----
configPic:

        movlw    0x07
        movwf    CMCON
        clrf     T1CON
        clrf     TMR1L
        clrf     TMR1H

;-----
        bsf      STATUS,RP0      ;banco 1
        clrf     TRISA
        clrf     TRISB

        bsf      PIE1,TMR1IE

;-----
        bsf      PIE1,RCIE
        movlw    spbrgCte
        movwf    SPBRG
        bsf      TRISB,1          ;rx ->input
        bcf      TXSTA,SYNC
        bsf      TXSTA,BRGH

        bsf      TXSTA,TXEN

```

```

;-----
bcf      STATUS,RP0      ;banco 0
bsf      RCSTA,SPEN
bsf      RCSTA,CREN
bsf      T1CON,T1CKPS0
bsf      T1CON,T1CKPS1
bsf      T1CON,TMR1ON
bsf      INTCON,PEIE
bsf      INTCON,GIE

return

;-----
;DelayTx
;-----
DelayTx:      movlw      0x00
              movwf      cnt2
dltx1        decfsz     cnt1
              goto       dltx1
              decfsz     cnt2
              goto       dltx1
              return

;-----
;Programa principal
;-----
main:
              call       configPic
              clrf        PORTA
              clrf        PORTB
              movlw       0x05
              movwf        cntTimer
              movlw       0x03
              movwf        cntDado

loop:
              goto        loop

;-----
;Interrupção
;-----

```

```

interrupt:                ;Salva STATUS e W
                           ;-----
bcf      INTCON,GIE
movwf    W_TEMP           ; salva o conteúdo do W ...
                           em W_TEMP
swapf    STATUS,W         ; salva o conteúdo do ...
                           STATUS ...
movwf    STATUS_TEMP      ; ... em STATUS_TEMP
                           ;-----

```

int1:

```

                           ;-----
int2:                    btfss   PIR1,RCIF
                           goto   int3
                           bcf     PIR1,RCIF
                           movf    RCREG,W      ;byte recebido da serial
                           movwf   byte
                           movwf   TXREG
                           decfsz  byte,w
                           goto     dado
                           movlw   0x03
                           movwf   cntDado
                           btfsc   PORTA,0
                           goto     desled
                           bsf     PORTA,0
                           goto     int_fim
desled:                  bcf     PORTA,0
                           goto     int_fim

```

dado:

```

data1:                  decfsz   cntDado,f
                           goto   data2
                           bcf     PORTA,2
                           movf    byte,w
                           movwf   auxTmrL
                           goto     int_fim

```

```

data2:                  decfsz   cntDado

```

```

goto    data3
bsf     PORTA, 2
movf    byte, w
movwf   auxTmrH
movlw   0x01
movwf   cntDado
goto    int_fim

data3:   decfsz  cntDado
goto    data4
movf    byte, w
movwf   TXREG
sublw   'S'
btfss   STATUS, Z
goto    int_c

;strobe

bcf     PORTA, 1
movlw   0x02
movwf   cntDado
goto    int_fim

int_c:   movf    byte, w
sublw   'C'
btfss   STATUS, Z
goto    int_fim

;camera

bsf     PORTA, 1
movlw   d'30'
movwf   cntCam
movlw   0x02
movwf   cntDado
goto    int_fim

data4:   goto    int_fim

;-----

int3:    btfss   PIR1, TMR1IF
goto    int4
bcf     PIR1, TMR1IF
movf    auxTmrH, w
movwf   TMR1H
movf    auxTmrL, w

```

```

movwf    TMR1L
decfsz   cntTimer
goto     des2
btfss    PORTA,1
goto     strobe
decfsz   cntCam
goto     foto
incf     cntCam
goto     int31
foto:
bsf      PORTB,3 ;camera
bcf      PORTA,3
goto     int31
strobe:
bsf      PORTA,3 ;strobe
bcf      PORTB,3
int31:
        movlw    0x05
movwf    cntTimer
goto     int_fim
des2:
        bcf      PORTB,3
bcf      PORTA,3

        goto     int_fim
int4:

;-----
;Restaura STATUS e W
int_fim:
swapf    STATUS_TEMP,W    ; restaura o conteúdo do ...
movwf    STATUS            ; ... registrador STATUS
swapf    W_TEMP,F         ; restaura o conteúdo ...
swapf    W_TEMP,W         ; ... do registrador W
bsf      INTCON,GIE
retfie

```

end

Apêndice B

Código de conversão pixel para milímetros

```
%% Matriz Transformação Projetiva k (Parâmetros Intrínsecos) Rt ...  
    (Parâmetros Extrínsecos)  
  
P = k*Rt;  
  
%% Centro das Coordenadas nas Coordenadas Globais Referenta as ...  
    Coordenadas da Câmera  
  
M = k*R;  
Ctil = -inv(M)*P(:,4);  
  
%% Carrega os Arquivos com os Pontos em Pixel  
  
load('Ptos_pixel.txt')  
  
px = Ptos_pixel(:,1);  
py = Ptos_pixel(:,2);  
  
%% Projeção inversa (encontrar os pontos a partir dos parâmetros)  
  
% Correção da Distorção Radial da Lente  
j = 1;  
for i = 1:size(px)
```



```

Xdis(:, :, j) = inv(M)*[px(i) py(i) 1]'; % Ptos em mm em relação ...
    coordenadas da imagem da camera
Xn(:, :, j) = [Xdis(1, :, i)/Xdis(3, :, i); Xdis(2, :, i)/Xdis(3, :, i)]; % ...
    Ptos normalizados
r2(j) = Xn(1, :, i)^2 + Xn(2, :, i)^2;
Xd(:, :, j) = (1 + k1*r2(i).^2 + k2*r2(i).^4)*Xn(:, :, i);
pc(:, :, j) = M*[Xd(:, :, i); 1]; % Ptos em Pixels
pcn(:, :, j) = [pc(1, :, i)/pc(3, :, i); pc(2, :, i)/pc(3, :, i)]; % Ptos ...
    normalizados
j = j + 1;
end

% Cálculo da Matriz Xtil (pontos em mm nas coordenadas globais em ...
    relação as coordenadas da câmera)

j = 1;
for i = 1:size(px)
    Xtil(:, :, j) = inv(M)*[pcn(1, :, i) pcn(2, :, i) 1]';
    mIN(j) = -Ctil(3, :)/Xtil(3, :, i);
    X(:, :, j) = mIN(i)*Xtil(:, :, i) + Ctil; % Matriz X (pontos em mm nas ...
        coordenadas globais)
    j = j + 1;
end

%% Gravar em Vetores e Salvar em txt

j = 1;
for i = 1:size(px)
    Vx(j, 1) = X(1, :, i);
    Vy(j, 1) = X(2, :, i);
    j = j+1;
end

Vxy = [Vx, Vy];

save('Ptos_milimetros_x.txt', 'Vx', '-ASCII');
save('Ptos_milimetros_y.txt', 'Vy', '-ASCII');

```

Apêndice C

Diagrama Esquemático do Circuito Elétrico de Controle da Câmera