

Ministério da Educação
Universidade Tecnológica Federal Do Paraná
Programa de Pós-Graduação em Engenharia
Mecânica



HENRIQUE SIDNEY RISSÁ

**IDENTIFICAÇÃO DE DESLOCAMENTOS DE BAIXA AMPLITUDE E
FREQUÊNCIA UTILIZANDO UMA CÂMERA DIGITAL**

DISSERTAÇÃO

CORNÉLIO PROCÓPIO

2017

HENRIQUE SIDNEY RISSÁ

**IDENTIFICAÇÃO DE DESLOCAMENTOS DE BAIXA AMPLITUDE E
FREQUÊNCIA UTILIZANDO UMA CÂMERA DIGITAL**

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

Orientador: Prof. Dr. Adailton Silva Borges

CORNÉLIO PROCÓPIO

2017

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação

R596 Rissá, Henrique Sidney

Identificação de deslocamentos de baixa amplitude e frequência utilizando uma câmera digital / Henrique Sidney Rissá. – 2017.

110 f. : il. color. ; 31 cm

Orientador: Adailton Silva Borges.

Dissertação (Mestrado) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica. Cornélio Procópio, 2017.

Bibliografia: p. 105-110.

1. Câmeras fotográficas digitais. 2. Medição. 3. Processamento de imagens. 4. Engenharia Mecânica – Dissertações. I. Borges, Adailton Silva, orient. II. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica. III. Título.

CDD (22. ed.) 620.1

Biblioteca da UTFPR - Câmpus Cornélio Procópio

Título da Dissertação Nº 018:

“Identificação de Deslocamentos de Baixa Amplitude e Frequência Utilizando uma Câmera Digital”.

por

Henrique Sidney Rissá

Orientador: **Prof. Dr. Adailton Silva Borges**

Esta dissertação foi apresentada como requisito parcial à obtenção do grau de **MESTRE EM ENGENHARIA MECÂNICA** – Área de Concentração: **Ciências Mecânicas**, linha de pesquisa: **Dinâmica De Sistemas Mecânicos**, pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica – PPGEM – da Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR – Câmpus Cornélio Procópio, às 09h do dia 28 de julho de 2017. O trabalho foi aprovado pela Banca Examinadora, composta pelos professores:

Prof. Dr. Adailton Silva Borges
(Orientador – UTFPR - CP)

Prof. Dr. Adriano Silva Borges
(UTFPR - CP)

Prof. Dr. Ricardo Breganon
(IFPR – Câmpus Jacarezinho)

Visto da coordenação:

Prof. Dr. Rogério Akihide Ikegami
Coordenador do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica
UTFPR Câmpus Cornélio Procópio

Dedico este trabalho à minha família, amigos, professores e colaboradores da instituição.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente deixo aqui registrado minha gratidão a Deus por permitir a concretização deste trabalho e sempre iluminar meus caminhos.

Especialmente, agradeço aos meus pais e toda minha família, os quais sempre me apoiaram em todas as decisões de minha vida.

Agradeço ao meu orientador Prof. Dr. Adailton Silva Borges, pela sabedoria com que me guiou nesta trajetória.

Aos meus colegas de laboratório e oficina da instituição.

A Secretaria do Curso, pela cooperação.

Gostaria de deixar registrado também, o meu reconhecimento à minha família, pois acredito que sem o apoio deles seria muito difícil vencer esse desafio.

A CAPES, instituição que concedeu bolsa durante todo o tempo necessário para o desenvolvimento do trabalho e conclusão do curso de Mestrado.

Enfim, a todos os que por algum motivo contribuíram para a realização desta pesquisa.

“No que diz respeito ao empenho, ao compromisso, ao esforço, à dedicação, não existe meio termo. Ou você faz uma coisa bem feita ou não faz”.

(Ayrton Senna)

“Você nunca sabe que resultados virão da sua ação. Mas se você não fizer nada, não existirão resultados.”

(Mahatma Gandhi)

RESUMO

RISSÁ, Henrique Sidney. **IDENTIFICAÇÃO DE DESLOCAMENTOS DE BAIXA AMPLITUDE E FREQUÊNCIA UTILIZANDO UMA CÂMERA DIGITAL** 2017. 110 f. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Cornélio Procópio, 2017.

O presente trabalho expõe a possibilidade da utilização de uma câmera digital para a detecção e aquisição de dados dinâmicos de pequenos deslocamentos. A técnica utiliza a digitalização e o pós-processamento das imagens de um vídeo, analisando-as quadro a quadro, ao longo do tempo total de gravação. Os dados de deslocamento foram adquiridos, simultaneamente por um método convencional e o desenvolvido neste estudo. Para o método convencional foi utilizado um sensor de proximidade, que teve seus dados coletados por meio de um sistema de aquisição. Já para a presente metodologia foi utilizado uma câmera digital e um relógio comparador acoplado a estrutura de interesse. A aquisição foi realizada de forma indireta, monitorando o deslocamento angular de um alvo posicionado no ponteiro do relógio comparador, que está rigidamente acoplado ao ponto de interesse. Tal procedimento foi adotado, devido à magnitude dos deslocamentos serem pequenos, o que impossibilitaria a medição direta, devido principalmente à resolução da câmera utilizada. Deste modo, foi possível confrontar os sinais adquiridos por meio da técnica proposta com um padrão de referência. Durante a realização dos testes iniciais utilizou-se um equipamento gerador de vibrações, conhecido como Shaker eletromecânico e um sensor de proximidade, a fim de validar a metodologia desenvolvida. Posteriormente, os testes foram direcionados para a aplicação da mesma diante de equipamentos perante condições reais de operação. Assim, a técnica proposta foi submetida a análises realizadas em uma máquina rotativa, onde foi possível analisar sua eficácia quanto a condições normalmente encontradas em plantas industriais. Neste caso foi utilizado também o sensor de proximidade para fins de averiguação por comparação dos dados adquiridos entre os dois métodos.

Palavras-chave: Câmera Digital. Medição de deslocamentos. Baixa frequência.

ABSTRACT

RISSÁ, Henrique Sidney. **Identification of low amplitude and frequency displacements using a digital camera.** 2017. 110 f. Graduate Program in Mechanical Engineering, Federal Technological University of Paraná. Cornélio Procopio, 2017.

This work exposes the possibility of using a digital camera to detect and acquire dynamic data of small displacements. The technique uses the digitization and post-processing of the images of a video, analyzing them frame by frame, over the total recording time. The displacement data were acquired simultaneously by a conventional method and the one developed in this study. For the conventional method a proximity sensor was used, which had its data collected through an acquisition system. For the present methodology, a digital camera and a dial indicator coupled to the structure of interest were used. The acquisition was performed indirectly, monitoring the angular displacement of a target positioned on the dial indicator hand, which is rigidly coupled to the point of interest. This procedure was adopted due to the magnitude of the displacements being small, which would make direct measurement impossible, mainly due to the resolution of the camera used. In this way, it was possible to compare the signals acquired by means of the proposed technique with a reference standard. During the initial tests, a vibration generator, known as an electromechanical Shaker and a proximity sensor, were used in order to validate the developed methodology. Subsequently, the tests were directed to the application of the technique to equipment under actual operating conditions. Thus, the proposed technique was submitted to analysis performed in a rotary machine, in which was possible to analyze its effectiveness in relation to conditions normally found in industrial plants. In this case, the proximity sensor was also used for the purpose of comparing the acquired data between the two methods.

Keywords: Digital camera. Displacement measurement. Low frequency.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Evolução da análise de vibrações.....	16
Figura 2 - Etapas de pré e pós-processamento das imagens.	23
Figura 3 - Distorção radial e tangencial.....	25
Figura 4 - Distorção em imagens (a) imagem ideal, (b) distorção tipo almofada, (c) distorção tipo barril.	25
Figura 5 - Espectro dos comprimentos de onda da luz visível.	27
Figura 6 - Diagrama de cores RGB.....	28
Figura 7 - Sensores (a) sensor CCD, (b) sensor CMOS.	30
Figura 8 - Capacitor MOS.....	31
Figura 9 - Origem das coordenadas (X,Y) da imagem.	33
Figura 10 - (a) imagem com 320x240 pixel, (b) imagem com 160x120 pixel, (c) imagem com 80x60 pixel.	34
Figura 11 - Fenômeno de aliasing.....	35
Figura 12 - (a) deslocamento (120 amostras por segundo.), (b) deslocamento (240 amostras por segundo), (c) deslocamento (480 amostras por segundo).	37
Figura 13 - Efeito do tempo de abertura do obturador. (a) velocidade do obturador de 1/15, (b) velocidade do obturador de 1/60, (c) velocidade do obturador de 1/1000. .	38
Figura 14 - Filtro de cores (a) imagem original, (b) imagem com aplicação de filtro seletor da camada vermelha.	40
Figura 15 - Segmentação da imagem em tons de cinza.	41
Figura 16 - Segmentação. (a) imagem original, (b) imagem binária obtida por segmentação após a aplicação de filtro da camada verde.....	42
Figura 17 - Operações Morfológicas.(a) imagem binária original, (b) erosão, (c) dilatação.....	44

Figura 18 - Ponto de referência do alvo.	45
Figura 19 - Centróide do alvo.	45
Figura 20 - Identificação do centróide dos alvos. (a) alvos na imagem. (b) Centróides.	46
Figura 21 - Bloco padrão.	47
Figura 22 - Relógio comparador.	49
Figura 23 - Representação do ponteiro do relógio comparador sobre a matriz de pixels.	50
Figura 24 - Representação espacial do vetor formado entre os dois alvos da imagem e seu deslocamento do ponto inicial A para o ponto B.	51
Figura 25 - (a) arranjo construtivo do sensor de proximidade. (b) ilustração das linhas de campo geradas pela bobina do sensor.	54
Figura 26 - Curva de sensibilidade do proximetro.	55
Figura 27 - Sinal de vibração no domínio do tempo.	57
Figura 28 - Desbalanceamento no espectro de frequências	58
Figura 29 - Grau de severidade em máquinas.	62
Figura 30 - Espectro de frequências.	63
Figura 31 - Fluxograma do processamento das imagens.	67
Figura 32 - Arranjo Experimental. (a) shaker, relógio comparador e proximetro; (b) esquema utilizado para a aquisição dos sinais por meio da câmera digital vs proximetro.	70
Figura 33 - Sistema para aquisição dos sinais do proximetro. (a) fonte, placa de aquisição, condicionador de sinais e circuito divisor de tensão. (b) detalhe do circuito divisor de tensão utilizado.	71

Figura 34 - (a) aparato para calibração do sensor de proximidade. (b) detalhe do shaker e sensor.....	72
Figura 35 - Curva de calibração proxímetro (MMQ) posicionado no shaker.	74
Figura 36 - Relógio comparador, sensor de proximidade e bloco de calibração.	75
Figura 37 - Identificação do ponteiro do relógio comparador (vetores referentes à posição do ponteiro do relógio comparador e sua trajetória).	76
Figura 38 - Dados obtidos com o processamento das imagens. (a) gráfico do Ângulo em coordenada polar. (b) gráfico do deslocamento total.	76
Figura 39 - Sinais coletados no Sensor de Proximidade. (a) gráfico da tensão em função do tempo; (b) gráfico do deslocamento total.....	77
Figura 40 - Comparativo entre resultados obtidos com a câmera e proxímetro. (a) gráfico deslocamento em função do tempo. (b) detalhe do deslocamento no intervalo de tempo entre 2 e 5s.	78
Figura 41 - Comparativo entre resultados obtidos com a câmera e proxímetro. (a) gráfico do espectro de frequências. (b) detalhe do pico de frequência em 1 Hz.	79
Figura 42 - Dados obtidos com o processamento das imagens. (a) identificação do ponteiro do relógio comparador - vetores referentes à posição do ponteiro do relógio comparador e sua trajetória. (b) gráfico do ângulo em coordenadas polares.	81
Figura 43 - Dados obtidos com o processamento das imagens. (a) gráfico deslocamento em função do tempo. (b) detalhe do deslocamento no intervalo de tempo entre 2 e 2.5s.	82
Figura 44 - Dados obtidos com proxímetro. (a) Gráfico deslocamento em função do tempo. (b) Detalhe do deslocamento no intervalo de tempo entre 2 e 2.5s.	82

Figura 45 - Comparativo entre resultados obtidos com a câmera e proxímetro. (a) Gráfico deslocamento em função do tempo. (b) Detalhe do deslocamento no intervalo de tempo entre 2 e 2.5s.	83
Figura 46 - Comparativo entre resultados obtidos com a câmera e proxímetro. (a) gráfico do espectro de frequências. (b) detalhe do pico de frequência em 15 Hz.	84
Figura 47 - Bancada de testes utilizada.	87
Figura 48 - Curva de calibração do proxímetro (MMQ) posicionado no redutor de velocidades.	89
Figura 49 - Detalhe da massa de desbalanceamento.	90
Figura 50 - Croqui do ponto de medição.	91
Figura 51 - Arranjo experimental. (a) equipamentos da bancada rotativa. (b) detalhe do posicionamento do sensor de proximidade e relógio comparador.	92
Figura 52 - Dispositivos de fixação do relógio comparador e do proxímetro.	92
Figura 53 - Configurações para a aquisição dos sinais. (b) esquema de aquisição utilizando o sensor de proximidade. vs câmera digital.	93
Figura 54 - Identificação do ponteiro do relógio comparador - vetores referentes à sua posição e sua trajetória.	95
Figura 55 - Dados obtidos com o processamento das imagens. (a) gráfico do Ângulo em coordenadas polares. (b) gráfico do deslocamento em função do tempo.	96
Figura 56 - Gráfico da tensão em função do tempo obtida com o proxímetro. (a) sinal original. (b) sinal filtrado.	96
Figura 57 - Gráfico deslocamento em função do tempo adquirido via proxímetro. ...	97
Figura 58 - Comparativo entre resultados obtidos com a câmera e proxímetro. (a) gráfico deslocamento em função do tempo. (b) detalhe do deslocamento no intervalo de tempo entre 2 e 4 segundos.	98

Figura 59 - Comparativo entre resultados obtidos com a câmera e proxímetro. (a) gráfico do espectro de frequências. (b) detalhe do pico de frequência de rotação do rotor (3.4Hz). (c) detalhe do pico de frequência do motor (24.4Hz).	99
Figura 60 - Critério de severidade dos índices de vibração.	101

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Configurações da qualidade do filme.	66
Tabela 2 - Equipamentos utilizados nos experimentos com o Shaker.	69
Tabela 3 - Dados da calibração do sensor.	73
Tabela 4 - Comparação entre os valores de frequência e amplitude (1 Hz).	79
Tabela 5 - Comparação entre os valores de frequência e amplitude (15 Hz).	84
Tabela 6 - Equipamentos utilizados nos testes com Redutor.	86
Tabela 7 - Dados provenientes da Calibração do Proxímetro.	88
Tabela 8 - Comparação entre os valores de frequência e amplitude (reductor)	100
Tabela 9 - Comparação entre os valores de deslocamento (RMS/0-pico).	102

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	15
2 OBJETIVOS.....	21
2.1 OBJETIVO GERAL.....	21
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	21
3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	23
3.1 CARACTERÍSTICAS DAS CÂMERAS.....	24
3.1.1 Distorção das lentes	24
3.1.2 Sistema de cores.....	26
3.1.3 Tipos de sensores	29
3.1.4 Aquisição e discretização espacial da imagem	32
3.1.5 Discretização temporal da imagem	34
3.1.6 Velocidade do obturador	38
3.2 PÓS-PROCESSAMENTO DA IMAGEM.....	39
3.2.1 Filtro das camadas de cores	40
3.2.2 Identificação dos alvos e binarização da imagem	41
3.2.3 Operações morfológicas em imagens binárias.....	43
3.2.4 Determinação do centróide dos alvos	44
3.2.5 Cálculo das dimensões dos pixels	46
3.2.6 Calibração e estimativa da precisão.....	49
3.3 SENSOR DE PROXIMIDADE	53
3.4 ANÁLISE DE VIBRAÇÕES	56
3.4.1 Medição de vibrações.....	59
3.4.2 Avaliação da severidade dos níveis de vibração.....	60
3.4.3 Análise espectral.....	62
4 TESTES EXPERIMENTAS E RESULTADOS	65
4.1 EXPERIMENTO 1 AQUISIÇÃO DE DADOS DE DESLOCAMENTO DE UM SHAKER	68
4.1.1 Calibração do sensor de proximidade com haste do shaker	72
4.1.2 Resultados para teste com frequência de 1 Hz.....	74
4.1.3 Resultados para teste com frequência de 15 Hz.....	80
4.2 EXPERIMENTO 2 AQUISIÇÃO DOS SINAIS DA CAIXA DE TRANSMISSÃO REDUTORA DE VELOCIDADES	86

4.2.1 Calibração do sensor de proximidade com redutor de velocidade	88
4.2.2 Definição do ponto de medição e configuração dos equipamentos	90
4.2.3 Avaliação dos resultados experimentais	94
6 CONSIDERAÇÕES FINAIS	103
REFERÊNCIAS.....	105

1 INTRODUÇÃO

Ao passo que o universo encontra-se inserido em uma constante evolução tecnológica, inúmeras técnicas e metodologias são desenvolvidas e aprimoradas nas mais diversas áreas da engenharia. A análise de vibrações mecânicas tem sido empregada nas mais diversas situações. E, atualmente representa uma poderosa ferramenta na detecção de anomalias, prevenção de falhas e até mesmo a predição do comportamento de estruturas inseridas em sistemas dinâmicos presentes em diversos ambientes industriais, corroborando para um alto nível de confiabilidade e robustez de seus equipamentos (SOUZA, 2003).

Segundo Mitchell (2008), o primeiro estudo relacionado à medição de vibrações mecânicas voltado para o monitoramento de uma máquina rotativa data de 1939, e foi realizado por T.C. Rathbone e publicado na revista '*Power Plant Engineering*' sob o título '*Vibration Tolerance*'. Por meio desse estudo, o autor introduz um guia para o monitoramento de vibrações em máquinas rotativas na faixa 1 Hz até 120 Hz.

Por volta dos anos 50, surge um grande avanço no cenário da análise de vibração que foi a análise do espectro em frequência de vibração. Até então o parâmetro da amplitude representava a única forma de análise, relacionando sua magnitude com a condição do equipamento. Porém, nesta etapa, com a análise dos padrões de frequência tornou-se possível detectar a natureza de um defeito e não somente a sua presença (MITCHELL, 2008).

Ao final dos anos 60, diversas indústrias registravam uma quantidade bastante considerável de problemas relacionados ao conjunto eixo-mancal em seus equipamentos. Em decorrência deste fato Mc Daniel e Wilhelm (1974) apresentaram o conceito de monitoramento do deslocamento de eixos rotativos e sua proteção através de medições de proximidade. Tal estudo evoluiu, e desde então diversos profissionais passaram a monitorar o deslocamento do eixo e de mancais em seus equipamentos.

O Instituto Americano do Petróleo (API - *American Petroleum Institute*), representado por Dick Dubner (Chevron) e Murray Rost (Mobil) lançou um guia de

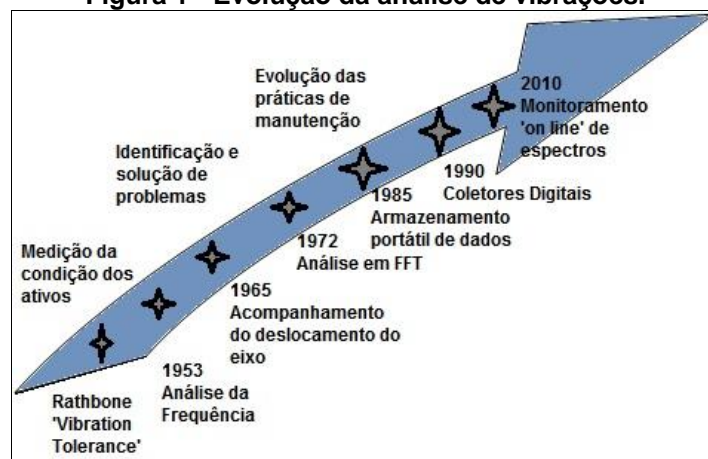
especificações para o projeto de máquinas, com faixas de velocidades de rotação, níveis de vibração aceitáveis bem como parâmetros de balanceamento de rotores.

Posteriormente, no ano de 1974 a International Standards Organization (ISO) publicou as primeiras normas ISO 2372 e ISO 3945, que abordam respectivamente a vibração mecânica de máquinas operando com velocidades de 10 até 200 rotações por segundo e a medição e avaliação da severidade. Pouco depois a ISO 2372 evoluiu para a ISO 10816 que trata da avaliação da severidade em máquinas industriais com potência acima de 15 KW e velocidades nominais entre 12 e 15000 rotações por minuto, por meio de medição em partes não rotativas.

Na década de 90, precisamente no ano de 1997, a General Motors Corporation publicou o *Standard for Machinery and Equipment*, norma que especifica critérios para amplitude máxima em diversas faixas de frequências de diversas classes de máquinas. Nesta mesma década o Mitchell (2008), evidencia a utilização de coletores digitais dos sinais de vibração.

Por último, Mitchell (2008), enfatiza a evolução da medição como monitoramento, permitida com avanços significativos da era digital e do armazenamento e processamento de dados, possibilitando até a medição e monitoramento portátil e 'online' durante a análise de vibrações em campo. A Figura 1 ilustra, de forma simplificada, a evolução delimitada acima.

Figura 1 - Evolução da análise de vibrações.



Fonte: Adaptado de Mitchell (2008).

Para a realização da análise de vibrações em uma determinada estrutura, faz-se necessária a aquisição dos parâmetros vibratórios existentes na mesma, para tal tarefa, usualmente utilizam-se sensores do tipo transdutores denominados acelerômetros. Tais sensores, por possuírem características de funcionamento baseadas no princípio da piezeletricidade, necessitam estabelecer um contato direto, seja ele puramente mecânico ou magnético, com a superfície do ponto de medição da estrutura. Contudo, existem determinados casos em que este contato da estrutura com o sensor de medição pode não ser desejado, seja pelo simples fato do difícil acesso ao ponto de medição ou até mesmo por interferir nas propriedades do sistema em que a estrutura encontra-se inserida, ocasionando resultados equivocados na medição. Outra limitação está relacionada a faixa de medição destes sensores, que variam de 10 Hz a 20 kHz, o que impossibilita a aquisição de sinais em máquina rotativas de baixa rotação.

Desta forma, a comunidade científica tem buscado alternativas para a medição sem contato de vibração mecânica. E, atualmente dois métodos de medição têm sido amplamente empregados, o método de medida por ultrassom e por laser (SABINO, 2013). Porém, por apresentarem seu princípio de funcionamento baseado na teoria de reflexão e contagem de pulsos de ondas, possuem restritas limitações quanto ao alvo que poderá ser medido e sua capacidade de reflexão superficial.

Dentre as diversas técnicas alternativas para aquisição de sinais sem contato, destaca-se a utilização de uma câmera digital como forma de sensor sem contato para a medição dos parâmetros de vibração em estruturas. Atualmente a presente técnica tem despertado grande interesse da comunidade científica. Fairbairn et al. (ANO), demonstra em seu trabalho o desenvolvimento de um sistema intitulado como ADIV-FR (Análise Dinâmica por imagens de Vídeo – Forma Remota), que utiliza técnicas de processamento de imagens baseadas no método então designado de videoscópico onde realiza análise individual de cada imagem ou quadro capturado durante a gravação de um vídeo. Na presente ocasião os autores descrevem a identificação dos alvos da imagem através do mapeamento do contraste presente na mesma, assim como a definição de referência para o centro de gravidade da região destacada para o estudo de sua posição.

Sabino (2013), discute em sua obra a utilização de ferramentas durante o processo de identificação dos alvos, destacando a aplicação de técnicas de processamento de imagens, dentre elas, separação de cores, detecção de bordas, segmentação, erosão e dilatação. O autor ainda discorre sobre questões concernentes à relação entre pixels e unidades de comprimento e apresenta resultados, relacionados à aplicação da técnica, satisfatórios para deslocamentos de magnitudes da ordem de 0.5 milímetros para testes estáticos e de 2.5 milímetros em contextos dinâmicos.

Leonardi (2015) apresenta em seu trabalho uma abordagem relacionada à aplicação do processamento de imagens em testes referentes ao procedimento de análise modal experimental de estruturas excitadas a partir de escoamentos controlados de ar, assim como, a aplicação da técnica no campo de ensaios de flexão e compressão de materiais.

Bartilson, Wieghaus e Hurlebaus (2015), destacam que as câmeras de vídeo oferecem uma capacidade única de coletar dados espaciais de alta densidade de uma cena de interesse. E, ressaltam ainda que, a utilização destes dados pode ser empregada para diferentes finalidades como monitoramento, inspeção remota ou simples arquivamento.

Os autores Bartilson, Wieghaus e Hurlebaus (2015) abordam em seu texto publicado em revista internacional a aplicação da técnica, de detecção de deslocamentos por meio do processamento de imagens, para análise de tensões atuantes em estruturas de maneira alternativa à utilização de extensômetros, assim como, a determinação de suas frequências naturais e identificação de seus respectivos modos de vibrar opcionalmente ao emprego de acelerômetros.

De acordo com Berton Junior (2015), o método de detecção de deslocamentos por meio do processamento de imagens pode ser expandido para medições em três dimensões, utilizando duas câmeras e fundamentos da estereoscopia.

Chen et al. (2015), aborda em sua obra a utilização do processamento de imagens no campo da análise modal, em estrutura excitada por meio de um martelo de impacto instrumentado, de maneira alternativa em relação aos sensores do tipo vibrômetro laser e acelerômetro convencional. De acordo com Chen et al. (2015) os principais desafios, inerentes à aplicação do processamento de imagens nestes eventos, estão relacionados aos formatos dos dados extraídos dos vídeos e à falta de

metodologias que possam desempenhar o papel de ampliação ou extrapolação de pequenos deslocamentos, a fim de permitir a identificação de deslocamentos em versões amplificadas.

Conforme evidenciado acima, a técnica que relaciona a utilização de uma câmera digital como sensor sem contato de medição e a análise de vibrações, podem contribuir para uma nova evolução no campo do estudo das vibrações. Deslocamentos, velocidades e acelerações em diversos pontos de uma estrutura poderiam assim ser analisados a partir do processamento quadro a quadro das imagens capturadas, de uma forma minimamente invasiva ao sistema dinâmico, o qual a estrutura em estudo encontra-se inserida.

Entretanto, devem-se observar, alguns parâmetros físicos e construtivos da câmera para que os pontos de interesse sejam devidamente adquiridos. Entre as características das modernas câmeras, pode-se citar duas principais, que são a velocidade de captura de vídeo e sua resolução.

A primeira encontra-se diretamente relacionada com o número de quadros que são capturados durante um segundo pela câmera digital. Este aspecto representa um ponto importante a fim de, evitar o fenômeno denominado *aliasing*, que ocorre sempre que um sinal é discretizado a uma taxa insuficiente para coletar informações sobre as mudanças do sinal ao longo do tempo (OPPENHEIM, 1989).

Para que uma câmera possua uma alta taxa de captura, alguns componentes principais devem ser considerados, o sensor de captura deve ser rápido o suficiente para captar imagens com a velocidade necessária, o processador deve ser rápido para processar e ajustar as imagens, e por último e talvez o mais importante, o dispositivo de armazenamento deve apresentar capacidade de transferir todos os dados captados. Ressalta-se ainda que, estes parâmetros estão intrinsecamente relacionados a resolução da imagem. Dado que, quando aumenta a resolução, conseqüentemente é aumentado o volume de dados a ser processado e armazenado o que eleva o tempo de tais operações. Deste modo, a maioria dos modelos de câmeras digitais limita a quantidade de quadros adquiridos com resolução superior, sendo assim, quanto maior a resolução, menor a taxa de quadros por segundo.

Após a correta seleção dos parâmetros de captura da câmera, as imagens são pós-processadas. O pós-processamento das imagens permite que sejam coletados os dados da posição de determinados pontos de uma estrutura. E, por meio de recursos computacionais baseados no método videoscópico, que consiste em uma

análise quadro a quadro das imagens digitalizadas de um vídeo gravado por uma câmera digital, pode-se identificar e estimar o deslocamento ocorrido na estrutura em estudo.

Desta forma, o presente trabalho apresenta uma metodologia de pós processamento de imagens, capturadas por uma câmera digital, para a obtenção de parâmetros de vibração mecânica de uma estrutura. Destaca-se que, a medição do deslocamento nos pontos foram realizadas sem o contato físico direto do sensor com a superfície do mesmo. Entretanto, o desenvolvimento da metodologia baseou-se na utilização de um instrumento de precisão denominado relógio comparador acoplado à estrutura, o que nos permite a extrapolação de limitações impostas por características técnicas de uma câmera digital, associadas a sua resolução, pois sem a utilização do relógio comparador, seria impossível a aquisição de pequenos sinais de deslocamento, dado que estes são muitas vezes menores que resolução mínima da câmera. Assim, o relógio comparador foi utilizado como um ampliador mecânico, a fim de almejar, a detecção de deslocamentos de baixa amplitude sobre baixas frequências.

No decorrer do presente trabalho, para fins de desenvolvimento, avaliação e validação da metodologia, primeiramente utilizou-se um equipamento gerador de vibrações, conhecido como Shaker eletromecânico, equipamento que permite a geração de vibrações com deslocamentos controlados, possibilitando assim explorar uma ampla faixa de frequências e amplitudes de oscilações.

Finalizada a etapa de validação, a presente metodologia foi testada em uma estrutura mais complexa, cuja finalidade era avaliar suas principais potencialidades da metodologia proposta. Assim, realizaram-se testes em uma máquina rotativa, onde foram coletados e analisados os índices de vibração em um equipamento, composto por um motor, redutor e rotor desbalanceado. Ao final, os resultados obtidos via processamento de imagens foram submetidos à análise comparativa com os dados adquiridos por meio de um sensor de proximidade.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo Geral

Desenvolver, avaliar e validar uma metodologia de identificação de deslocamentos dinâmicos estruturais de máquinas rotativas de baixa frequência utilizando uma câmera digital e processamento de imagens.

2.2 Objetivos Específicos

Como objetivos específicos pode-se destacar:

- a) Desenvolver, implementar computacionalmente e avaliar os procedimentos numéricos para identificação de pontos de interesse, alvos, para processamento e identificação de imagens;
- b) Desenvolver de procedimentos experimentais de forma que seja possível adquirir sinais dinâmicos de baixa frequência e amplitude através de câmeras digitais cujas dimensões são inferiores a resolução da câmera utilizada;
- c) Avaliar e validar a metodologia com base na confrontação dos dados obtidos pela presente metodologia e utilizando um sensor de proximidade, em deslocamentos controlados por um gerador de sinais e produzidos por um excitador eletromagnético (Shaker);
- d) Utilizar a presente metodologia de identificação de deslocamento de baixa frequência e amplitude em uma bancada de testes em laboratório, para posterior confrontação dos resultados com base nos dados obtidos por sensores de proximidade e avaliação da condição da bancada com base na norma ISO 10813-3.

Destaca-se que, apesar de algumas sub-rotinas já terem sido desenvolvidos para identificação de alvos dinâmicos em trabalhos anteriores no âmbito do laboratório como apresentado por Montilha (2014) e Berton Junior (2015), o mesmo precisou ser reformulado para se adequar aos processamentos de alvos indiretos, que eram transferidos da estrutura a um relógio comparador rigidamente acoplado ao ponto de interesse, de forma, a amplificar mecanicamente o valor do deslocamento, e assim, ser possível a sua identificação utilizando uma câmera digital. Observa-se ainda que, a principal contribuição da presente dissertação está no fato de se desenvolver uma metodologia para identificação de alvos dinâmicos que oscilam em baixa frequência,

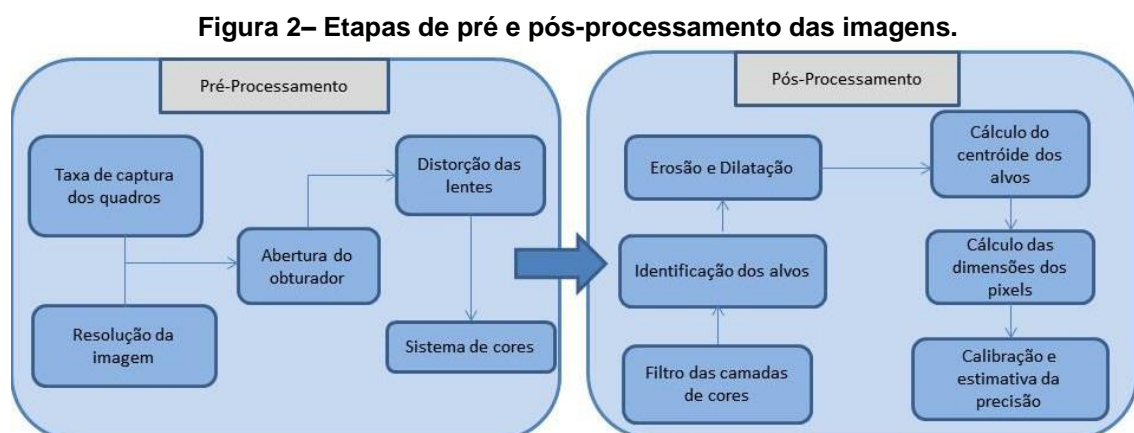
que são impossíveis de se identificar utilizando sensores convencionais, como acelerômetros piezelétricos, pois a frequência de interesse é inferior a faixa de operação dos mesmos, que varia de 10Hz a 20 KHz. Para tais análises, normalmente são utilizado sensores de proximidade, e por esta razão os resultados apresentados pela presente metodologia serão confrontados com estes.

3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

A presente seção tem por finalidade a exposição de conceitos fundamentais relacionados a metodologia de aquisição de dados de deslocamento experimentais, desta forma são abordados os seguinte temas, o funcionamento das câmeras digitais, os procedimentos relacionados ao pré-processamento e ao pós-processamento de imagens.

Assim, destaca-se que, as fases de aquisição e pré-processamento das imagens é realizada nos componentes internos, sensores e processadores de informação, presentes nos mais diversos *hardwares* de câmera digitais. E cabe ao usuário, de acordo com as possibilidades de cada arranjo, ajustar seus parâmetros e configurar para diferentes finalidades e aplicações. Dentre os mais importantes destacam-se a resolução da imagem e a taxa de captura dos quadros, conforme é mostrado no lado esquerdo do diagrama apresentado na Figura 2. Destaca-se ainda que, o ajuste correto de tais parâmetros é fundamental para o posterior pós-processamento de dados.

Na etapa de pós-processamento foi desenvolvida a metodologia para a identificação de alvos pré-definidos através de sub-rotinas implementadas em ambiente Matlab, cuja finalidade foi o processamento de imagens e manipulação de matrizes para a extração de informações presentes em cada quadro do vídeo capturado na etapa anterior. Esta última etapa é o principal foco do presente trabalho. A região do lado direito da Figura 2 ilustra esta etapa.



Fonte: Próprio Autor.

Nota-se que, as etapas acima são complementares e para a correta aquisição dos dados de deslocamento é necessário conhecê-las profundamente. Desta forma, nas seções a seguir as etapas ilustradas na Figura 2 serão detalhadas. Assim, as principais características de hardware da câmera são abordadas na seção 3.1, enquanto, etapas dos pós-processamento são abordadas na seção seguinte 3.2.

3.1 Características das câmeras

As câmeras digitais, por possuírem grande quantidade de tecnologia embarcada, atualmente, fornecem uma ampla faixa de utilização para os mais variados fins. Com característica construtiva complexa, devido ao fato de apresentar diversos componentes eletrônicos de elevado nível tecnológicos embarcados, entre eles, sensores de captura de luminosidade, processadores e componentes de armazenamento, cujo funcionamento geral é limitado pelo funcionamento simultâneo destes, por esta razão serão detalhadamente estudados nas seções seguintes.

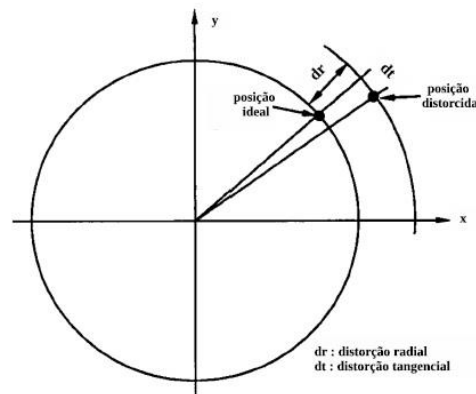
3.1.1 Distorção das lentes

O conjunto de lentes das câmeras é utilizado para focalizar toda a luz refletida a partir dos corpos e objetos presentes na cena até o sensor, para que este realize a captura instantânea de todo o cenário. A quantidade de lentes presente no conjunto pode variar de acordo com a complexidade construtiva da câmera e sua finalidade de utilização. Apesar de que, tecnicamente, uma lente convexa simples seja suficiente para focalizar toda a luz até o sensor, na prática torna-se necessária a utilização de outros elementos de lente óptica para a correção de distorções ocasionadas pelas lentes (PEREIRA, 2014). Este fato está diretamente associado a imperfeições construtivas das mesmas, que inserem distorções às imagens capturadas, que usualmente podem ser de dois tipos, a distorção radial e a tangencial.

Tais imperfeições presentes nas lentes reais podem ser caracterizadas pela descentralização, ou seja, a não coincidência entre o eixo óptico e o mecânico de um elemento da lente, assim como, devido ao desalinhamento ou inclinação entre os elementos da lente e o sensor de captura da imagem. Em decorrência disto, a utilização de lentes implica em distorções geométricas, tanto na direção radial como

tangencial sobre a imagem, mais especificamente sobre a posição dos pixels na imagem. Na Figura 3 são evidenciadas as distorções nas direções radial e tangencial, onde se pode observar o ponto da posição ideal e a sua posição distorcida, acrescida das distorções radial (dr) e tangencial (dt).

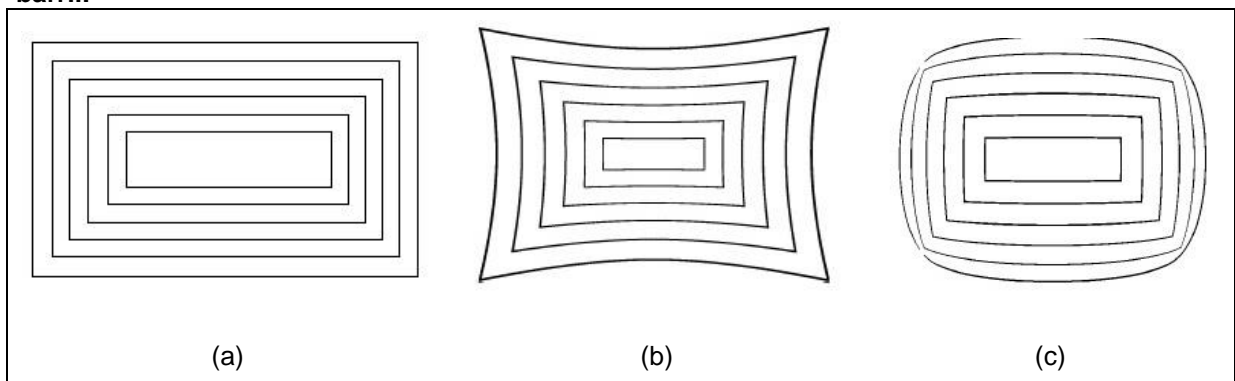
Figura 3– Distorção radial e tangencial.



Fonte: Pereira (2014).

Para Lobão (2004), na maioria das câmeras comerciais, a distorção radial representa a parte mais significativa, a qual pode ser normalmente notada devido aos efeitos denominados de barril e almofada. Estes efeitos estão ilustrados na Figura 4.

Figura 4 – Distorção em imagens (a) imagem ideal, (b) distorção tipo almofada, (c) distorção tipo barril.



Fonte: Pereira (2014).

Na Figura 4 a é mostrada a imagem ideal, enquanto que, na Figura 4b é mostrado que, a distorção radial do tipo almofada, acomete a imagem principalmente na região de suas bordas, e na região central pode-se considerá-la insignificante, assim como na distorção radial tipo barril, apresentada na Figura 4c.

Segundo Lobão (2004) a distorção do tipo tangencial é essencialmente decorrente de fenômenos físicos normalmente designados como prisma fino e/ou descentralização, os quais são decorrentes da dispersão dos centros ópticos efetivos em diferentes regiões da lente ou conjunto de lentes utilizadas na captura da imagem.

Para Pereira (2014), o fenômeno de prisma fino ocorre, principalmente, devido a uma pequena inclinação entre os elementos da lente e o sensor de imagem e também de outras imperfeições na produção da lente.

Em uma imagem capturada por uma câmera digital ocorre a soma destes dois principais tipos de distorções, ou seja, uma combinação de distorções radiais e tangenciais. A presença destas distorções é um problema significativo no estudo de imagens digitais, sendo a correção deste efeito uma tarefa essencial no pós-processamento das imagens, principalmente em aplicações que requerem informação de medida e resultados precisos (WANG, et al., 2006).

A correção das distorções geradas pelas lentes podem ser aplicadas nas imagens de diferentes formas, dentre elas, pode-se citar os métodos de interpolação de pixels da imagem a partir de parâmetros extraídos da câmera ou de argumentos de acordo com as propriedades das imagens.

Sabino (2013) discute em seu trabalho, conforme evidenciado na Figura 4, que a região central das imagens praticamente não sofre distorções, o que implica no fato de que, caso a região de interesse da imagem seja sua área central, não é necessário realizar a correção das mesmas. Portanto, no presente trabalho, optou-se por posicionar os pontos de interesse no centro das imagens adquiridas.

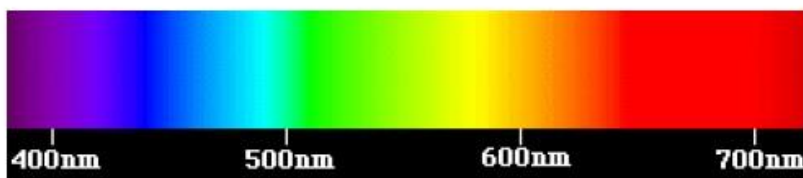
3.1.2 Sistema de cores

As cores, que também podem ser denominadas de luz visível, representam uma parcela diminuta, que varia de 400 nm a 700 nm, do espectro eletromagnético de comprimentos de onda da luz (SOUTO, 2003), conforme ilustrado na Figura 5.

Segundo Scuri (2002), todo o restante do espectro eletromagnético é ocupado por outros tipos de ondas, que não produzem sensações visuais, como por exemplo, ondas de raio-x, ultravioleta e infravermelho, além de sinais de rádio e televisão. Segundo Souto (2003), de acordo com a CIE (*Commission Internationale de l'Eclairage*), desde 1931 aceita-se, internacionalmente, os valores de 435.8 nm, 546.1 nm e 700 nm, como os comprimentos de onda que representam no espectro, as três

cores primárias consideradas aditivas, denominadas de azul, verde e vermelho, respectivamente.

Figura 5- Espectro dos comprimentos de onda da luz visível.



Fonte: Souto (2014).

Dentre os vários sistemas de cores utilizados pode-se citar o sistema CMYK, HSV e RGB. O CMYK é um sistema de cores cuja sigla é formada pelas cores *Cyan* (Ciano), *Magenta* (Magenta), *Yellow* (Amarelo) e *Black* (Preto), destaca-se que não se utiliza a letra B para o *Black* (preto) já que esta letra é usada na designação do Blue (azul). Segundo Guimarães (2003), o CMYK (também chamado de cor-pigmento) é um sistema muito utilizado na indústria gráfica, onde é utilizado para impressão em cores com tinta, com o objetivo de ocultar algumas cores, quando o fundo é branco, para diminuir a luminosidade e ressaltar a combinação das quatro cores. O CMYK pode reproduzir todas as principais faixas de cores existentes.

Além das cores primárias (ciano, magenta e amarelo), também é usada a cor preta, considerada como a "cor chave" por ser essencial para definir os detalhes de uma imagem.

Enquanto o CMYK é a cor-pigmento, o sistema RGB (vermelho, verde e azul) é definido como a cor-luz, sendo utilizado nos objetos que emitem luz, como nos principais sistemas de imagens, aplicados, por exemplo, em televisores e projetores.

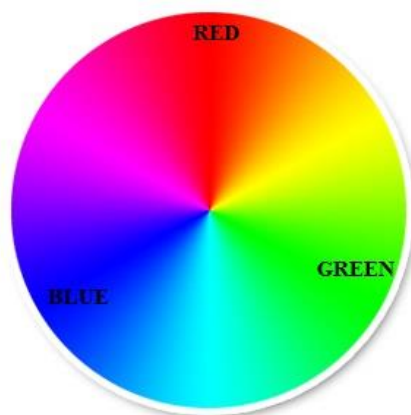
Outro sistema de cores muito utilizado por artistas plásticos para a obtenção das mais variadas cores é o modelo HSV, definido pela abreviatura de tom (*Hue*), saturação (*Saturation*) e valor (*value*).

De acordo com Alves (2010), este sistema de cores define o espaço de cor utilizando estes três parâmetros de cor, tom, saturação e brilho. Onde o tom ou matiz representa a cor pura com saturação e luminosidade máximas, o que permite fazer distinção entre as várias cores puras e exprime-se num valor angular entre 0 e 360 graus. A saturação indica a maior ou menor intensidade da tonalidade da cor, tecnicamente, descreve a quantidade de cinza presente e define-se em uma escala

percentual de 0 a 100 % ou em valores absolutos variando de 0 a 1. E, por fim, o valor representa a luminosidade ou brilho, isto é, se uma cor é mais clara ou mais escura, seja ela por efeito de emissão ou reflexão da luz. Para o primeiro caso este efeito tem relação à luminosidade, já para o segundo o brilho, também é determinada em escala percentual de 0 a 100 % ou absoluta de 0 a 1.

O sistema de cores RGB (*red, gren, blue*) apresenta como principal característica o fato de que, uma variedade de cores pode ser representada por uma combinação das três componentes espectrais primarias. Para Keese (2013), este sistema de cores pode ser classificado como aditivo, uma vez que se utiliza da combinação de maneira aditiva de cores primárias para a produção das demais, possibilitando a geração de até 16 milhões de tonalidades diferentes. Essas tonalidades são formadas de acordo com a quantidade destas cores primárias, que em suas escalas são representadas de 0 a 255. A Figura 6 ilustra um diagrama formado a partir desses três tons de cores fundamentais.

Figura 6 - Diagrama de cores RGB.



Fonte: Próprio autor.

As cores de uma imagem capturadas por este sistema são formadas por uma combinação de valores atribuídos às suas três componentes básicas, e caso, seja atribuído o mesmo valor para as três, gera-se um tom neutro, denominado gris ou tom de cinza. Este tom neutro assume dois extremos, o branco puro ou preto puro, o primeiro quando se faz a atribuição do valor 255 e o segundo a atribuição do valor 0 para as três componentes espectrais primárias de cor (KEESE, 2012).

De acordo com Rubert et al., (2004) existe a possibilidade de obtenção de uma imagem em tons de cinza a partir de uma combinação das camadas de uma

imagem RGB, em sua obra os autores apresentam uma equação (1), onde define uma imagem em escala de cinza por meio de suas componentes de vermelho (*Red*), verde (*Green*) e azul (*Blue*).

$$Y = 0.299R + 0.587G + 0.114B \quad (1)$$

Na Eq. 01 a variável Y representa a imagem convertida para a escala ou tons de cinza, e as letras R, G e B representam o valores associados às camadas vermelha, verde e azul respectivamente. Definindo assim um sistema de cores intitulado de Tons de Cinza ou Escalas de Cinza.

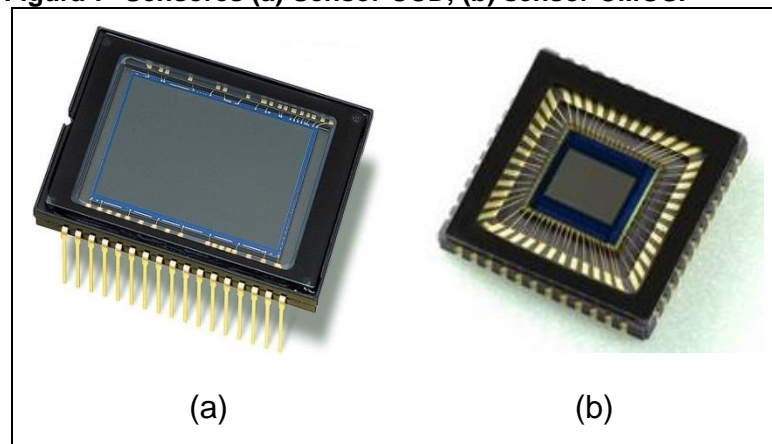
Destaca-se ainda, que no presente trabalho optou-se por os sistemas RGB e Tons de cinza devido às características dos equipamentos utilizados e a determinação da coloração dos alvos.

3.1.3 Tipos de sensores

Segundo Souza e Cardoza (2012), o termo sensor pode ser empregado para designar dispositivos sensíveis a alguma forma de energia, (seja ela do tipo cinética, térmica, luminosa, etc...), proveniente do ambiente, que relacionam informações sobre uma determinada grandeza (temperatura, pressão, velocidade, posição) a ser mensurada, com a energia recebida. Os sensores das câmeras digitais convertem toda a energia luminosa presente na cena em energia elétrica, que posteriormente pode ser processada digitalmente.

São encontrados em câmeras digitais, usualmente dois tipos de sensores, o sensor CCD (Charge Coupled Device) e o CMOS (*Complementary Metal-Oxide-Semiconductor*), conforme mostrado na Figura 7.

Figura 7- Sensores (a) Sensor CCD, (b) sensor CMOS.



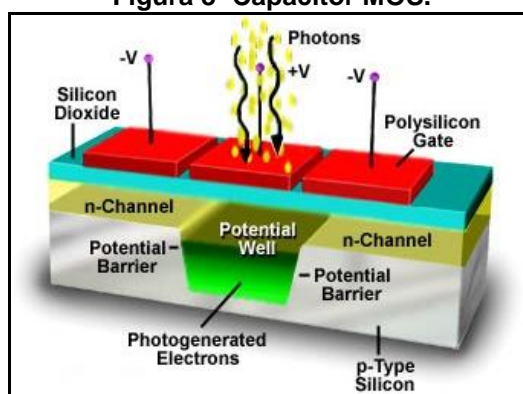
Fonte: Leite (2014).

Ambos contam com a presença de dispositivos semicondutores, cuja função, é capturar a imagem a partir de seu feixe de luz focalizado através das lentes, e transformá-la em sinais elétricos. Tais sinais, posteriormente são processados por um circuito eletrônico que gera uma imagem digital (GORETTI, 2006). Estes dispositivos possuem seu princípio de funcionamento fundamentado em células sensíveis à luz, que também podem ser chamados de pixel (MANUEL, 2005).

O sensor CCD apresenta características de funcionamento semelhantes aos painéis de captação da energia solar para a transformação em energia elétrica. No caso destes painéis, a luz solar incide sobre uma placa formada por várias células, que possuem a capacidade de realizar a transformação da energia térmica absorvida da luz solar em energia elétrica. De maneira análoga, a superfície do sensor seria representada pelo painel solar, onde cada célula representaria um pixel (SOUZA e CARDOZA, 2012).

Destaca-se ainda que, nos sensores CCD, capacitores são responsáveis pela tarefa de transformar a energia luminosa em energia elétrica. Estes capacitores são construídos com a tecnologia MOS (*Metal-Oxide Semiconductor*), a qual utiliza materiais semicondutores associados a componentes eletrônicos. Para Goretti (2006), um capacitor MOS é aquele que realiza a conversão de fótons em cargas elétricas, e, essas cargas são reconhecidas e processadas por um circuito integrado, por meio da quantização da energia potencial do capacitor. A Figura 8 exibe a arquitetura construtiva de um capacitor MOS.

Figura 8- Capacitor MOS.



Fonte: Souza e Cardoza (2012).

Em relação ao seu funcionamento, a captura da imagem se faz toda de uma vez, o que acarreta um tempo de processamento maior (ZURICH, 2001). Os dispositivos CCD são caracterizados quanto ao seu mecanismo de transferência de dados, o qual trabalha com quadros (*frames*). Estes quadros, segundo Goretti (2006) são divididos em três categorias: *Full Frame* (transferência do quadro completo); *Split Frame Transfer* (transferência parcial de quadro) e *Interline Transfer* (transferência entre linhas).

O sensor CMOS apresenta as mesmas propriedades de captura de imagem e capacidade de gerar uma carga elétrica proporcional à intensidade de luz incidente na superfície do sensor. A diferença entre os dois está na forma com que estes transformam a energia luminosa em energia elétrica.

Assim, com relação às características construtivas e de funcionamento, este tipo de sensor é constituído de micros diodos fotossensíveis, posicionados em linhas e colunas sob a forma de uma matriz, que convertem a luz recebida em carga elétrica. De acordo com Wendling (2010), estes tipos de diodo podem ser denominados de fotodiodos, e operam segundo o princípio de que, caso ocorra a incidência de fótons sobre uma junta semicondutora, os mesmos liberam portadores de carga, que geram uma tensão entre os terminais do diodo. Esta operação pode ser executada em velocidades extremamente rápidas, podendo detectar pulsos de luz a taxas de dezenas ou mesmo centenas de mega-hertz (WENDLING, 2010).

Tal arranjo construtivo permite que este tipo de sensor seja mais compacto e apresente menor tempo de processamento da imagem final, o que possibilita aquisição em taxas mais elevadas, de modo que a quantidade de quadros capturados por segundo seja suficiente para a percepção do movimento (ZURICH, 2001). A

construção da imagem de cada quadro ocorre de acordo com a leitura de uma linha de pixels por vez até que, o processador construa a imagem completa.

De acordo com Berton Junior (2016), os sensores CCD usam obturadores globais (global shutter), o que permite que os dados de tensão sejam armazenados no mesmo instante para todos os pixels, e em sequência processados. Entretanto, nos sensores CMOS, por causa da sua maneira de operação, adota-se o obturador móvel (rolling shutter) para realizar a leitura das linhas de pixels sequencialmente na matriz do sensor, fazendo com que o momento de captura de cada linha seja levemente atrasado com relação ao tempo de captura da linha anterior.

Desta forma, como as linhas das imagens capturadas a partir de sensores CMOS são expostas em diferentes intervalos, a cena na imagem fica distorcida caso a velocidade de movimento de algum objeto seja superior à capacidade de processamento total do sensor (SUN e LIU, 2012).

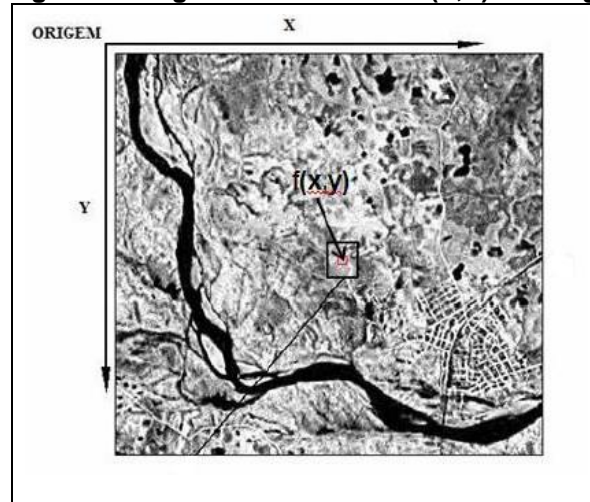
O sensor que contempla o modelo da câmera utilizada nos testes do presente trabalho é do tipo CMOS, devidos suas características construtivas que permitem a aquisição de dados dinâmicos, sob diferentes taxas de aquisição, e ainda, á custos relativamente acessíveis em relação aos sensores do tipo CCD.

3.1.4 Aquisição e Discretização espacial da imagem

O pixel é o elemento básico de uma imagem e suas formas mais comuns são os formatos geométricos quadrado ou retangular (Albuquerque et al., 2003).

Segundo Araújo (2015), existem dois tipos fundamentais de imagem digital. A primeira seria do tipo vetorial, que é descrita por posição e tamanho de formas com linhas curvas, círculos e retângulos. A segunda é do tipo rastreio e pode ser chamada também de bitmap, pois apresenta uma matriz de pixels, que correspondem, ponto a ponto, à imagem que está representando.

Para Gonzalez e Woods (2007), uma imagem digital do tipo bitmap pode ser compreendida como uma função $f(x,y)$, discretizada tanto em coordenadas espaciais quanto em brilho, onde x e y correspondem respectivamente às coordenadas das linhas e colunas da matriz que representa a imagem. De acordo com o conceito matemático de que uma matriz não possui posição negativa, tais coordenadas são estritamente positivas e o ponto de origem de ambas encontra-se localizado no ponto superior esquerdo da imagem, a Figura 9 ilustra a origem das coordenadas.

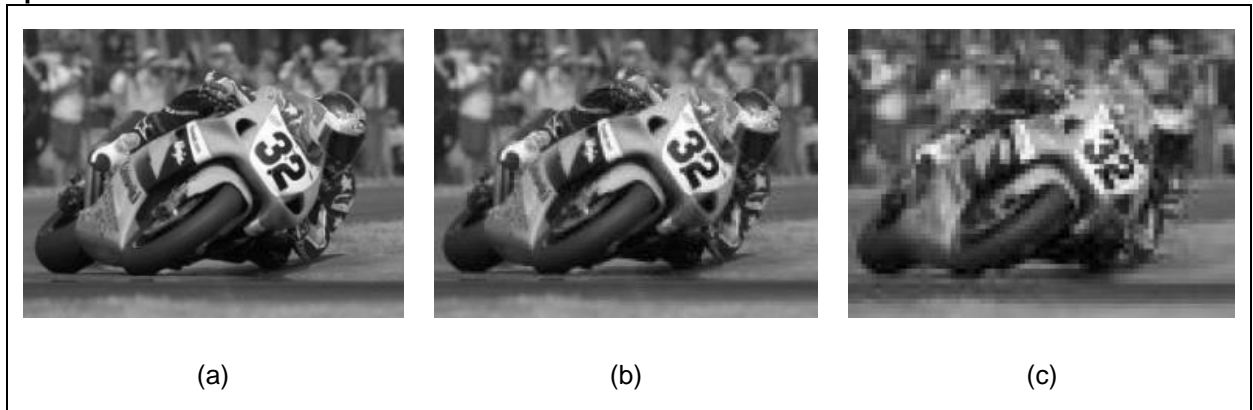
Figura 9– Origem das coordenadas (X,Y) da imagem.

Fonte: Leite (2014).

A discretização espacial da imagem, na forma de uma matriz bidimensional, está diretamente relacionada com a resolução do processo de amostragem espacial, que se refere à quantidade de amostras da cena que são adquiridas por unidade de comprimento. Cada imagem, conforme discutido na seção anterior, forma-se no sensor, que é dividido em pixels. Desta forma, cada pixel é responsável por amostrar uma pequena região da cena. O tamanho dessa pequena região da cena compreende-se como a resolução espacial, devido ao fato de que cada região dessas acabará tornando-se um ponto na imagem. Assim, quanto maior a quantidade de pixel amostrado maior será a resolução espacial da imagem construída por este conjunto de pixel.

Quanto maior a número de amostras capturadas da cena, maior será a informação capturada para reconstrução da cena, deste modo maior será qualidade da imagem construída a partir destas amostras. A Figura 10 ilustra o efeito da relação da quantidade de pixel nas direções horizontais e verticais de uma imagem com a qualidade de sua resolução espacial.

Figura 10 - (a) imagem com 320x240 pixel, (b) imagem com 160x120 pixel, (c) imagem com 80x60 pixel.



Fonte: Artis (2012.)

As três imagens foram capturadas sob as mesmas condições de luminosidade, a única diferença entre elas foi a amostragem espacial, ou seja, a quantidade de amostras que foram retiradas da cena real para a construção da imagem.

Na Figura 10a pode-se visualizar uma imagem composta por 320 pixels na direção horizontal e 240 pixels na direção vertical, onde os contornos dos objetos presentes nela são bem mais definidos que a imagens das Figuras 10b-c. A Figura 10b-c é formada por 160 e 80 pixels em cada linha da direção horizontal, 120 e 60 pixels em cada coluna da direção vertical, respectivamente, e, portanto, ambas apresentando uma nitidez e definição inferiores.

Destaca-se que, devido às características delimitadas acima, optou-se por utilizar das imagens do tipo bitmap na presente metodologia.

3.1.5 Discretização temporal da imagem

Uma extensão natural para imagens seria considerar que é possível haver uma sequência de imagens, representando uma variação de uma cena ao longo do tempo. De fato, o sistema de visão do ser humano envia constantemente para o cérebro a informação visual captada pelo olho, induzindo-o a enxergar de forma contínua imagens bidimensionais projetadas na retina no decorrer do tempo.

Os mesmos princípios de amostragem do olho humano podem ser estendidos para uma câmera digital. Assim, é possível discretização temporal a fim de possuir um

número finito de imagens em um determinado período. Este procedimento resulta no problema de determinação da taxa de amostragem (SCURI, 2002).

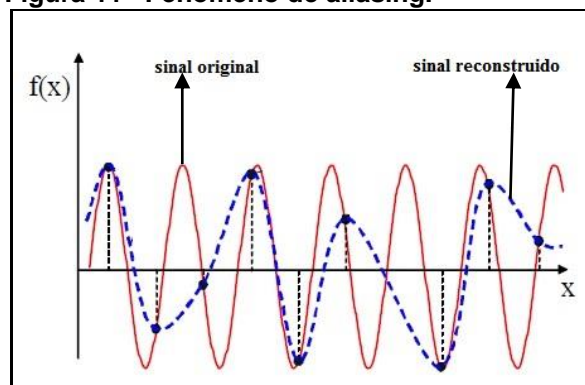
Neste processo a amostragem representa-se pela velocidade de captura dos quadros do vídeo, ou taxa de aquisição dos quadros, medida em frames (quadros) por segundo (fps). Esta taxa pode também ser chamada de frequência de amostragem e está diretamente relacionada com a eficácia da percepção de movimento do objeto em estudo.

Segundo Oppenheim (1989), o processo de amostragem pode ser definido como o armazenamento do valor medido a partir de um sinal analógico durante intervalos de tempo, o que permite a posterior reconstrução digital do mesmo sinal amostrado. Desta forma, para que este processo seja executado com eficácia satisfatória, as características do sinal reconstruído digitalmente devem corresponder com as mesmas do sinal analógico original. Para isto, todo o processo de amostragem deve ser executado levando em consideração o Teorema de *Nyquist*, o qual define que, para a correta aquisição de um sinal variando continuamente no tempo ocorra, é necessário que taxa de amostragem deste sinal seja no mínimo duas vezes o valor da frequência máxima desempenhada pelo objeto em estudo.

O presente teorema impede que a incidência de um fenômeno muito comum durante o processo de amostragem, chamado de *Aliasing*, que ocorre quando se utiliza uma amostragem inadequada do sinal analógico, e, ao reconstruí-lo digitalmente, obtém-se resultados inconsistentes com o real e esperado (SCURI, 2002).

A Figura 11 ilustra um sinal de onda do tipo senoidal submetida à amostragem insuficiente, ocasionando em uma reconstrução defeituosa da forma de onda do sinal.

Figura 11– Fenômeno de aliasing.



Fonte: Adaptado de Scuri (2002).

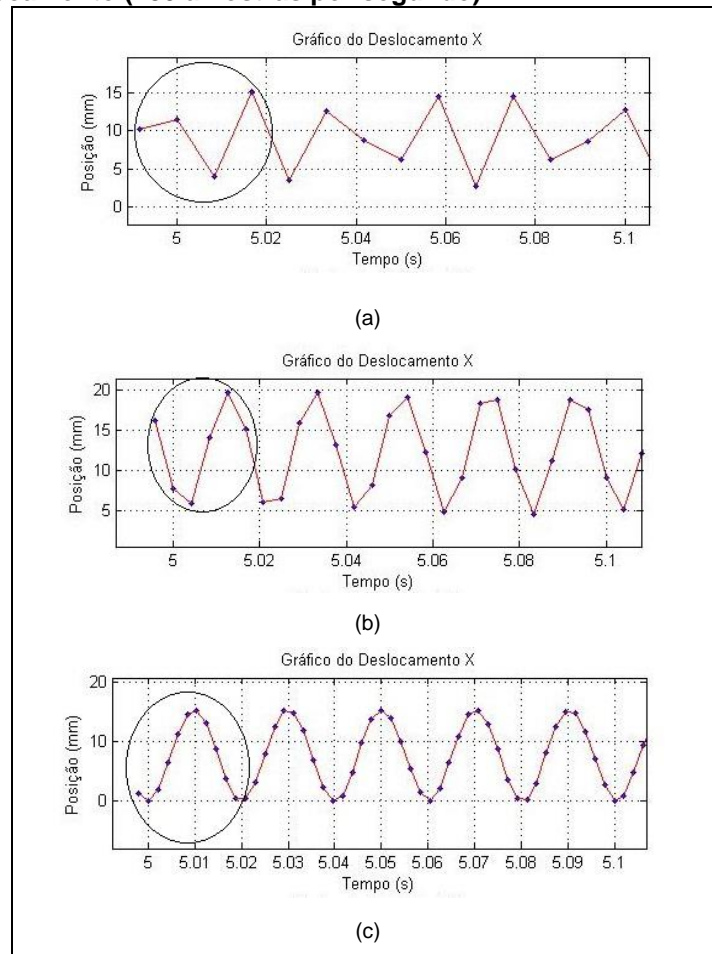
Pode-se observar o fenômeno de *Aliasing* em diversas situações, inclusive quando nota-se que movimento de rotação da roda de um automóvel parece estar na direção oposta ao movimento do veículo. Este efeito visual ocorre justamente porque a taxa de amostragem temporal está muito baixa, deste modo a roda está girando em uma frequência maior do que a câmera é capaz de capturar.

Vale ressaltar que, uma vez atendida a condição relacionada à frequência de *Nyquist* e evitado o fenômeno de *Aliasing*, este procedimento garante apenas que o valor de frequência possa ser estimado fielmente, porém este fato não atribui à reconstrução do sinal a garantia de que o mesmo seja reconstruído de maneira compatível à forma de onda do sinal original.

Assim, ao se analisar, por exemplo, um sinal de vibração, com forma de onda senoidal e frequência conhecida estipulada em 50 Hz, que foi coletado sob três diferentes taxas de aquisição, conforme mostrado na Figura 12, pode-se observar que existe uma diferença perceptível na reconstrução digital do sinal.

A primeira aquisição dos sinais foi realizada 2.4 vezes a frequência de deslocamento do sinal de vibração, resultando em uma taxa de aquisição de 120 amostras por segundo, o que atende ao critério de *Nyquist*, Figura 12a. Em um segundo momento, a taxa de aquisição dos sinais foi configurada para o dobro da primeira, o que representa uma coleta de 240 amostras por segundo, Figura 12b. E, por fim, em um terceiro momento foram adquiridos os dados do sinal de vibração sob a taxa de 480 amostras por segundo, Figura 12c. Destaca-se que as três aquisições foram realizadas controladamente alterando apenas a taxa de aquisição das amostras, permanecendo constantes todos os demais parâmetros, assim como o tempo total da operação.

Figura 12– (a) Deslocamento (120 amostras por segundo), (b) deslocamento (240 amostras por segundo), (c) deslocamento (480 amostras por segundo).



Fonte: Próprio Autor.

Na Figura 12a observa-se que, apesar de atender à frequência mínima de amostragem de duas vezes a frequência de operação, a reconstrução do sinal amostrado apresenta-se deficitária, com pouca definição e regularidade na posição dos pontos ao longo do tempo. Ressalta-se ainda que, mesmo realizando uma aquisição de dados com frequência de amostragem superior à frequência mínima (cerca de 5 vezes), ainda não foi suficientemente precisa para a reconstrução da onda, ponto a ponto, do sinal amostrado, este fato pode ser observado no detalhe da Figura 12b. Entretanto, quando utilizada uma taxa de amostragem de aproximadamente 10 vezes à frequência de operação, notou-se uma melhora na dispersão dos pontos no decorrer do tempo, assegurando a perfeita reconstrução do sinal analógico ao sinal amostrado, conforme se observa na Figura 12c. O que destaca uma frequência de amostragem adequada para a finalidade do estudo. Atribui-se ao resultado de estar mais bem representado o sinal adquirido com maior taxa de aquisição, a circunstância

de possuir maior quantidade de pontos no intervalo de tempo, responsáveis pela reconstrução do sinal (ZHANG e HUANG, 2006).

3.1.6 Velocidade do obturador

Segundo Artis (2012), a maioria das filmagens de vídeo normais é realizada com velocidade ou tempo de abertura do obturador configurada em $1/60$ segundos, a menos que o operador da câmera deseje um efeito especial ou pretenda utilizar um quadro congelado na pós-produção.

Embora a velocidade do obturador também afete a exposição e a profundidade de campo, sua principal utilidade é controlar como a cena ou ação, será captada em cada quadro do vídeo. O efeito que a alteração da velocidade do obturador causa na imagem pode variar de uma imagem com os contornos de objetos arrastados ou borrados, e uma imagem com um movimento e contornos bem nítidos. A Figura 13 exibe três imagens de um objeto em movimento capturadas a diferentes velocidades ou tempo de abertura do obturador.

Figura 13 - Efeito do tempo de abertura do obturador. (a) Velocidade do obturador de $1/15$, (b) velocidade do obturador de $1/60$, (c) velocidade do obturador de $1/1000$.



Fonte: Artis, 2012.

Em cada uma das três imagens presentes na Figura 13, o deslocamento do homem com sua bicicleta desenvolve a mesma velocidade, ou seja, a ação é exatamente a mesma em cada imagem, apenas a velocidade de abertura do obturador da câmera foi modificada. Na Figura 13a as imagens foram coletadas com a velocidade do obturador ajustada em $1/15$ s e pode-se notar o efeito de arraste ou borrão em um quadro congelado do vídeo. Já na Figura 13b é apresentada a imagem capturada com velocidade do obturador configurada em $1/60$ s que seria a velocidade

considerada normal para a produção de vídeos, porém neste caso, em que ocorre a movimentação do ciclista no decorrer do tempo, a cena da imagem obtida não apresenta grande nitidez e definição dos contornos. Contudo, com um ajuste de velocidade do obturador em 1/1000s a imagem congelada de um quadro do vídeo se apresenta visualmente com um alto nível de definição e nitidez, conforme pode ser observado na Figura 13c.

Deste modo, a velocidade de abertura do obturador apresenta-se como um importante parâmetro durante qualquer operação que envolva a captura de imagens.

3.2 Pós-Processamento da imagem

O escopo da visão computacional é estudar e relatar sistemas de visão artificial implementados por *software* e aplicados em *hardware*. Isto se torna possível através da utilização de algoritmos, que possuem a função de extrair diversas informações a partir de imagens digitais. Para o ser humano, fazer uma análise de uma imagem parece ser uma tarefa simples, isso porque o sistema de visão humano possui o cérebro para processar paralelamente tudo o que contempla a imagem.

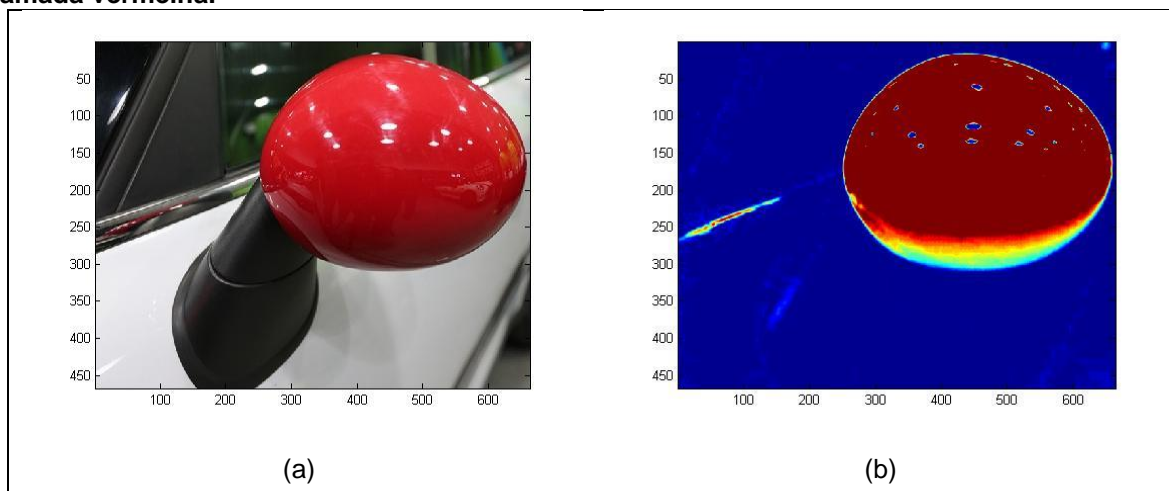
As técnicas dedicadas à análise e pós-processamento de imagens podem variar significativamente de acordo com sua complexidade e tempo de processamento. Assim, processar uma imagem consiste em transformá-la sucessivamente com o objetivo de extrair a informação presente nela. O processamento de imagens parte da imagem ou de uma sequência destas para obter essa informação (ALBUQUERQUE et al., 2008).

Para Cardoso e Braga (2010), durante seu processamento, uma imagem é vista como um arquivo que contém informações sobre os valores de cores de cada pixel da imagem, bem como, as posições destes pixels no espaço delimitado pela cena. As próximas seções serão dedicadas ao detalhamento do processo de pós-processamento de imagens.

3.2.1 Filtro das camadas de cores

A aplicação de filtros é amplamente utilizado no processamento de imagem, de acordo com alguns propósitos e finalidades como, a identificação ou realce de orlas e contornos de imagem e também a eliminação de ruído (Magalhães e Oliveira, 2005). A maioria destes filtros atua limitando a valores pré-determinados ou selecionando intervalos de valores das frequências das cores presentes na imagem. Deste modo, existe a possibilidade de selecionar e destacar um determinado objeto do restante do cenário de uma imagem através de seu tom de cor. Em imagens coloridas no formato RGB, estes filtros também podem ser configurados para a seleção de determinados valores destas três camadas de cores fundamentais, a vermelha, a verde e a azul. A Figura 14 demonstra a aplicação do filtro seletor da camada vermelha em uma imagem.

Figura 14 - Filtro de cores (a) Imagem original, (b) imagem com aplicação de filtro seletor da camada vermelha.



Fonte: Próprio Autor.

A Figura 14a exibe uma imagem original de um retrovisor de cor vermelha de um automóvel de cor branca, e a Figura 14b apresenta o resultado da aplicação de um filtro que seleciona apenas a camada vermelha da imagem. A aplicação desse tipo de filtro de camadas de cores pode ser utilizada a fim de, selecionar e separar do restante da cena um determinado objeto presente na mesma.

Destaca-se que no presente trabalho foram utilizados os procedimentos de aplicação de filtros de camadas de cores para a detecção dos alvos, assim como, a utilização de procedimentos de seleção de regiões da imagem por meio de escalas

de tons de cinza, com o propósito de identificação do bloco de calibração a fim de determinar os parâmetros de medição por processamento de imagens.

3.2.2 Identificação dos alvos e binarização da imagem

De acordo com Albuquerque et al. (2003) segmentar consiste em dividir a imagem em diferentes regiões, que serão posteriormente analisadas por algoritmos especializados em busca de informações consideradas de 'alto-nível'.

A segmentação também pode ser considerada como um processo de classificação de determinados pixels da imagem (PADILHA, 2006). Essa classificação pode ser designada de acordo com o histograma de alguma propriedade, normalmente o nível de coloração cinzenta ou o brilho presente na imagem.

A Figura 15 exibe uma imagem em tons de cinza submetida ao processo de segmentação.

Figura 15 Segmentação da imagem em tons de cinza.



Fonte: Padilha (2006)

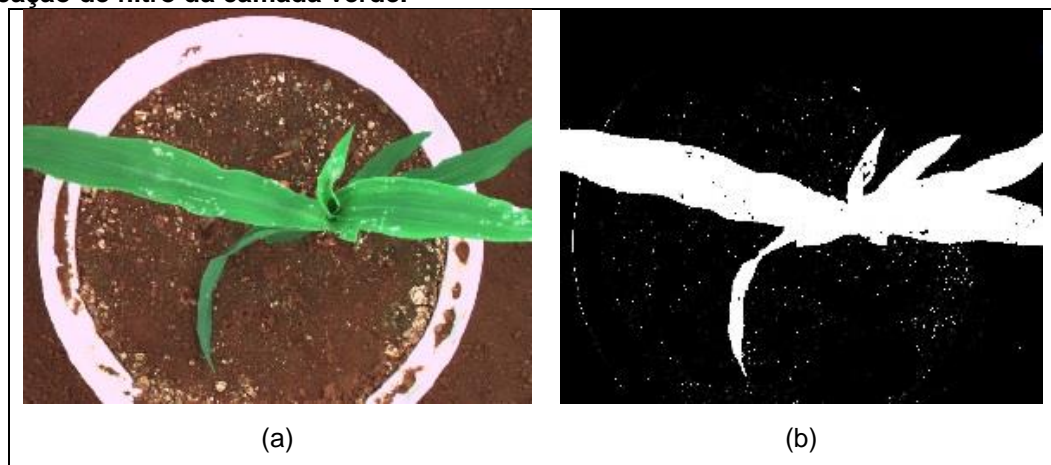
A seleção do limiar de corte, responsável por realizar a separação entre as classes de pixels consideradas como cinza claro, cinza escuro, quase brancos, quase pretos, branco e preto varia em uma escala de 0 a 225, conforme é evidenciado na seção 3.1.2. A aplicação dessa separação de classes de pixel por tonalidade de cor pode ser utilizada quando se deseja destacar algum objeto do restante da cena da imagem.

Após a segmentação da imagem em tons de cinza, as demais regiões podem ser eliminadas da cena através da determinação de um limite de tonalidade baseado

na região de interesse, delimitando assim, que as regiões que se encontram dentro deste limite permaneçam na imagem e o restante seja descartado. A parte descartada assume a coloração puramente preta e a região de interesse apresenta-se na cor puramente branca, construindo assim uma imagem composta de apenas duas regiões, e no presente trabalho será denominada como imagem binária.

A imagem obtida ao final do processo de binarização é composta por apenas duas regiões, uma região de coloração branca e outra de coloração preta. Esta imagem com apenas dois níveis de cor é denominada de imagem binária. Para Albuquerque et al. (2003), estas imagens são frequentemente utilizadas no processo de tratamento da informação, devido ao fato de apresentar uma maior facilidade de manipulação, principalmente por sofrer uma redução significativa na quantidade de dados atribuídos às mesmas. A Figura 16 exhibe uma imagem binária, obtida pelo processo de segmentação, após a aplicação de filtro da camada verde na imagem de uma planta em um vaso.

Figura 16 -Segmentação. (a) Imagem original, (b) imagem binária obtida por segmentação após a aplicação de filtro da camada verde.



Fonte: Gomide et. al. 2002.

A imagem original capturada de uma planta encontra-se representada na Figura 16a. Essa imagem, após ser submetida à aplicação de um filtro que seleciona apenas a camada de cor verde, recebe o tratamento de segmentação da imagem resultando em uma imagem binária, exibida na Figura 16b. A imagem binária obtida é definida apenas por duas cores, branca e preta, onde a região de coloração branca representa as áreas acometidas por tons de coloração verde na imagem original, enquanto todo o restante da imagem assume a coloração preta.

Pode-se notar na Figura 16b a existência de alguns pontos brancos dispersos de forma isolada sobre determinadas áreas da imagem, tais pontos representam regiões pontuais que possuem alguma tonalidade da coloração verde. Uma vez que a área de interesse da imagem é determinada pela região das folhas da planta, a qual é representada predominantemente pela coloração verde na imagem original, tais pontos isolados presentes na imagem binária podem ser definidos como ruídos. A extinção destes ruídos pode ser realizada com a aplicação de algumas operações morfológicas na imagem binária.

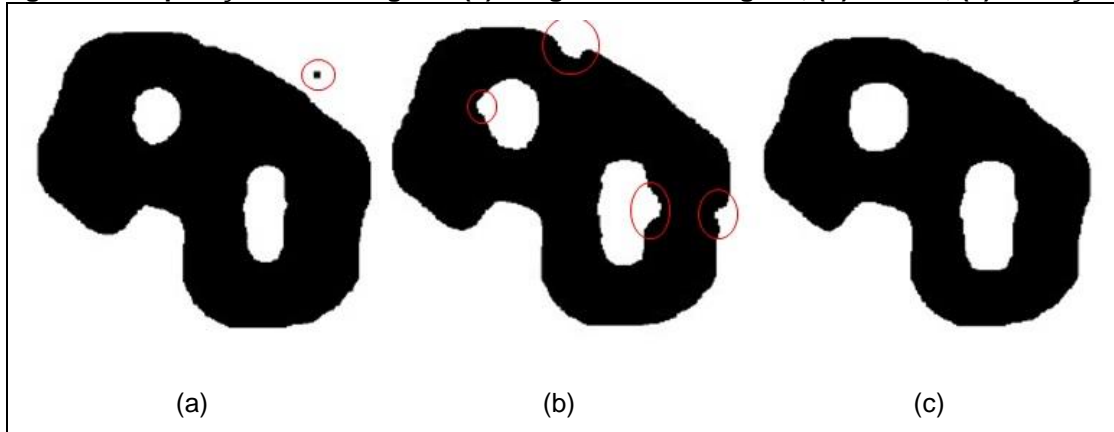
3.2.3 Operações morfológicas em imagens binárias

De acordo com Castleman (1995) e Scuri (2002), a erosão e dilatação são duas operações morfológicas básicas em processamento de imagens. A erosão realiza a remoção das bordas de áreas existentes na imagem, esta remoção pode ser determinada em função da quantidade de pixels estipulada pelo usuário, de forma a extinguir ruídos, que são representados por pequenos pontos dispersos na imagem, quando a quantidade de pixels selecionada representa toda a extensão de sua área. Na Figura 17a é possível observar a imagem binarizada com a presença de ruído, destaca pelo círculo de coloração vermelha. Já na Figura 17b nota-se a inexistência do ruído, entretanto, este processo acaba retirando alguns pixels da região de interesse, conforme ilustrado pelos círculos na presente figura.

A dilatação adiciona pixels na região das bordas de áreas pertencentes à imagem, desta forma, os pixels retirados indesejavelmente poderão ser reinseridos por meio do processo de dilatação, de acordo com a Figura 17c.

Como as pequenas áreas que representavam os ruídos foram eliminadas, apenas a região de interesse recebe estes pixels, possibilitando assim a recuperação da informação perdida durante a erosão.

Figura 17 - Operações Morfológicas.(a) Imagem binária original, (b) erosão, (c) dilatação.



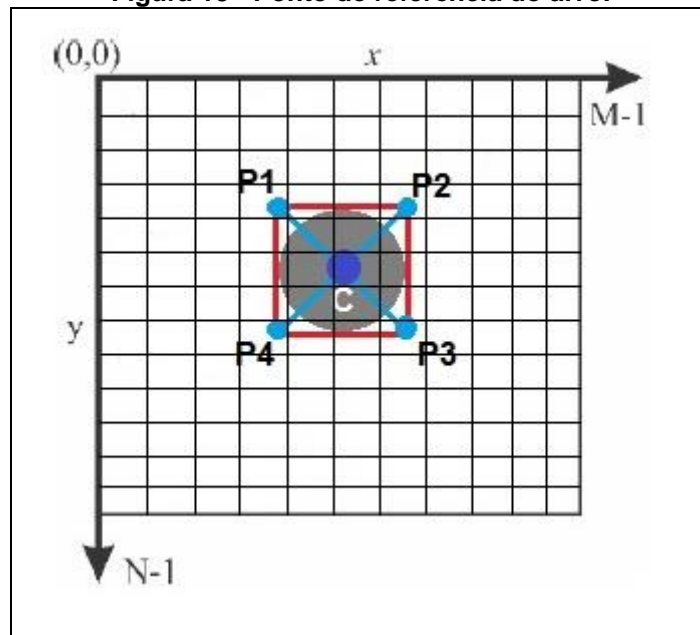
Fonte: Adaptado de Mello et. al. (2012)

Desta forma, com a sucessiva aplicação destas duas operações morfológicas denominadas erosão e dilatação possibilita eliminar pequenos ruídos presentes nas imagens sem comprometer a informação presente na mesma. Estes dois procedimentos foram implementados via algoritmo computacional, em ambiente Matlab, e utilizados durante o pós-processamento das imagens adquiridas no decorrer dos testes realizados no presente trabalho.

3.2.4 Determinação do centroide dos alvos

O ponto adotado como posicionamento do alvo foi definido como o centroide da região ocupada pelo mesmo na imagem. O cálculo para a determinação deste ponto pode ser realizado através da obtenção do ponto formado pela intersecção das retas delimitadas pelos Pontos 1 e 3 com os Pontos 2 e 4, representados esquematicamente na Figura 18. Observa-se que, os pontos de 1 a 4 formam uma caixa de contorno ao redor da região do alvo.

Figura 18 - Ponto de referência do alvo.



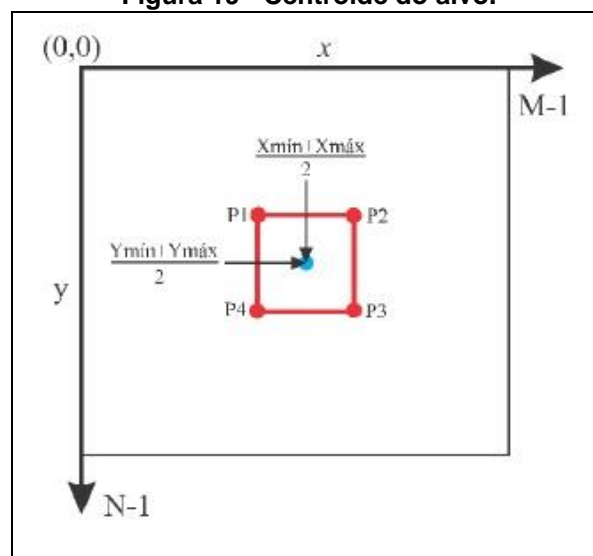
Fonte: Próprio Autor.

Para a determinação das coordenadas do centróide do alvo pode-se utilizar a Equação 2, que relaciona o valor das posições mínimas nas coordenadas X e Y mais a metade do comprimento em cada eixo.

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

Na Figura 19 é apresentado o passo final para obtenção do centro do objeto.

Figura 19 - Centróide do alvo.

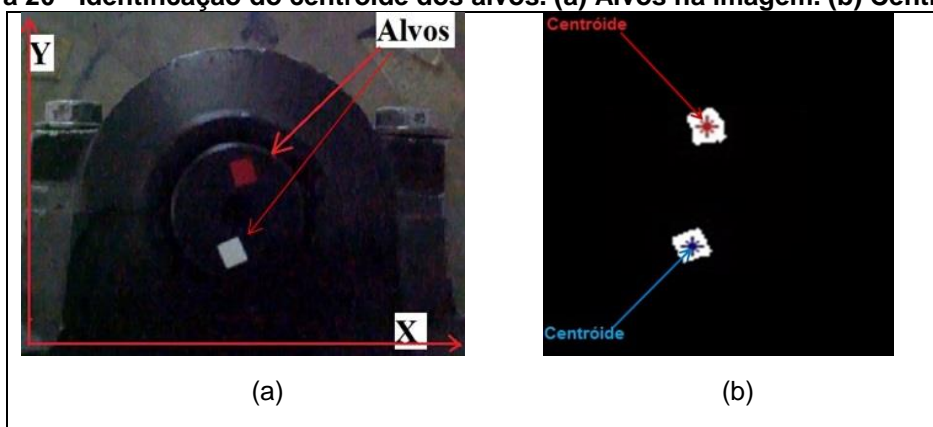


Fonte: Próprio Autor.

Assim o ponto de referência sobre o alvo pode ser definido no espaço bidimensional XY e sua posição monitorada no decorrer do tempo.

No presente trabalho, este cálculo foi realizado utilizando subrotina em ambiente Matlab. A Figura 20 ilustra o reconhecimento de dois alvos, um de coloração vermelha e o outro branco e seus respectivos centroides, destacados pelos pontos azul e vermelho sobre os alvos, respectivamente, conforme Figura 20b.

Figura 20 - Identificação do centróide dos alvos. (a) Alvos na imagem. (b) Centróides.



Fonte: Próprio Autor.

Deste modo, com o ponto de referência definido e conhecido, o deslocamento do alvo é obtido a partir da sequência de imagens extraídas do vídeo, sendo que as posições de seu centróide na cena para cada imagem representam seu movimento no decorrer do tempo, assim a diferença entre a posição do centróide em uma imagem inicial e outra posição obtida em outra imagem representa o caminho percorrido pelo alvo. Quando o alvo está se movendo, a diferença da posição dos centroides (em pixels) entre as duas posições permite calcular o deslocamento do alvo. Ao término do processamento da sequência de imagens têm-se as posições do centróide do alvo para cada instante em que a imagem foi capturada, formando assim, o corresponde deslocamento do alvo ao longo do tempo de filmagem.

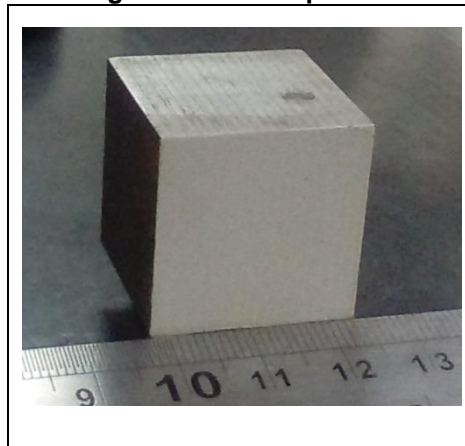
3.2.5 Cálculo das dimensões dos pixels

O procedimento adotado para estimar as dimensões de cada pixel da imagem consiste em, um primeiro momento, calcular a quantidade de pixels existentes em uma

delimitada região de área conhecida e presente na imagem, para, em um segundo momento, estipular uma relação de pixels por unidade de área.

A região de área conhecida na imagem, foi representada pela face de um bloco padrão com área de 1 pol², fabricado em material metálico usinado e retificado com precisão de 0.01mm. Para fins de pós-processamento de imagem a face adotada como referência recebeu uma pintura da cor branca, conforme pode ser observado na Figura 21.

Figura 21– Bloco padrão.



Fonte: Próprio autor.

A quantidade total de pixels existente na região da face do bloco pode ser estimada por meio do pós-processamento da imagem com o auxílio da sub-rotina “bwarea” do software Matlab. Deste modo, de posse da medida da área e do número de pixels existente na mesma, pode-se encontrar uma relação entre a quantidade de pixel por unidade de comprimento. Neste caso específico, foi intencionalmente definido a ordem de grandeza de 1 pol² para as dimensões da área, a fim de poder encontrar a resolução em PPI (pixels per inches) ou pontos por polegada da imagem. A área de uma unidade de pixel pode ser calculada em milímetros por meio do quociente entre a área da face do bloco (A_f) e a resolução R em ppi, conforme a Equação 3.

$$A_p = \left(A_f / R \right) \quad \Rightarrow \quad A_p = \left((25.4)^2 / R \right) \quad (3)$$

Como o número de pixels existentes nas linhas horizontais se difere da quantidade de pixels nas linhas verticais da imagem, para o cálculo do comprimento horizontal de uma unidade de pixel deve-se levar em consideração a relação entre o número total de pixels na linha vertical pelo número total de pixel em uma linha horizontal. A Eq. 4 apresenta a expressão para o cálculo da dimensão horizontal do pixel (Dh_p) a partir de sua área total (S_p), da quantidade de pixels na direção vertical (*shuttleVideo.Height*) e a quantidade de pixels na direção horizontal (*shuttleVideo.Width*).

$$Dh_p = \sqrt{\left(S_p * \text{shuttleVideo.Height} / \text{shuttleVideo.Width} \right)} \quad (4)$$

A dimensão na direção vertical de cada pixel pode ser calculada por meio do produto entre a relação do número de pixel na horizontal e vertical e a dimensão horizontal do pixel (Dh_p). A Eq. 5 descreve a expressão para a obtenção da dimensão vertical (Dv_p) do pixel.

$$Dv_p = Dh_p * \left(\text{shuttleVideo.Width} / \text{shuttleVideo.Height} \right) \quad (5)$$

Dessa maneira podem-se calcular as dimensões em milímetros de cada pixel nas duas direções, horizontal e vertical. Para, de posse destas informações, realizar a conversão do deslocamento percebido em pixel para a unidade de medida métrica.

Além dos deslocamentos lineares nas direções horizontal (X) e vertical (Y), a metodologia propõe-se a detectar e mensurar o deslocamento angular de alvos, por meio da transformação de coordenadas cartesianas para coordenadas polares. No presente trabalho este estudo foi desenvolvido a fim de identificar o ponteiro de um relógio comparador como um vetor no espaço bidimensional XY e monitorar seu deslocamento angular.

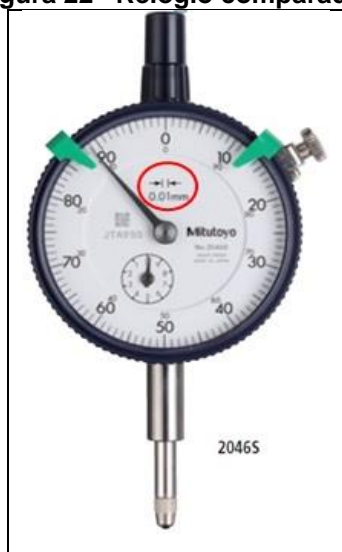
3.2.6 Calibração e estimativa da precisão.

Conforme já abordado anteriormente, a precisão do método proposto depende diretamente da resolução da imagem, ou seja, a quantidade de pixels presente na mesma, e das dimensões destes pixels. Entretanto, outros elementos devem ser considerados para determinar a precisão do método, entre eles o fator de escala do relógio comparador (Figura 22). Pois devido ao papel desempenhado pelo mesmo, de amplificação do movimento, o que permite à presente metodologia identificar pequenos deslocamentos.

De acordo com o fabricante, a menor medida que o instrumento pode fornecer é de 0.01 milímetros, o que representa a menor divisão de sua escala, cuja faixa (range), varia continuamente de 0 a 100. Desta forma, quando atinge o valor limite de sua escala (100), o relógio percebe um deslocamento total de 1 milímetro em sua ponta de contato, este fato gera um deslocamento angular no ponteiro do relógio de 360 graus.

Esta informação conclui que, para cada 360 graus de deslocamento angular do ponteiro do relógio tem-se um deslocamento de 1 milímetro. Assim o fator de escala para a conversão de unidades de deslocamento angular para deslocamento linear caracteriza-se em 1 mm para 360° (1:360).

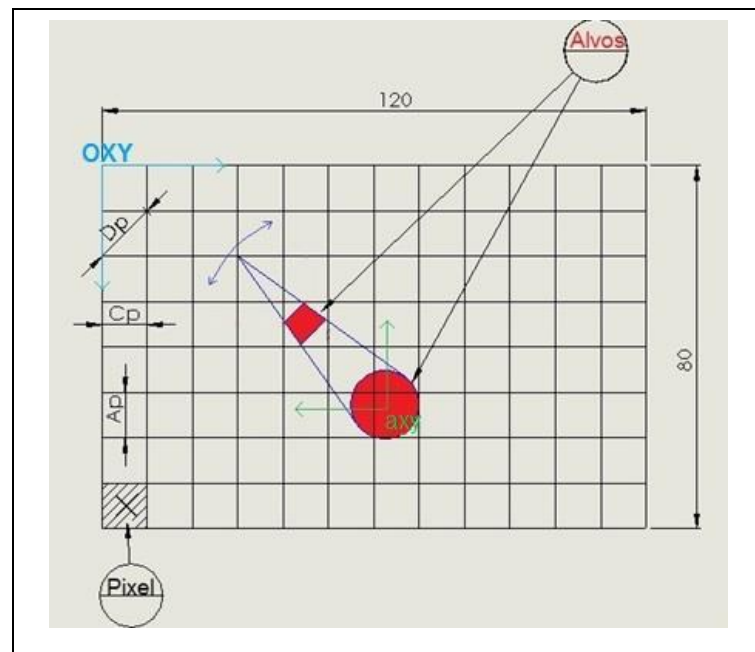
Figura 22– Relógio comparador.



Fonte: Mitutoyo.

Além do fator de escala deve-se atentar ao fato de que, durante o processamento das imagens, os alvos presentes no ponteiro do relógio comparador, são identificados e localizados a partir uma matriz bidimensional de pixels. Desta forma, a precisão com que a posição do ponteiro é identificada, varia de acordo com as dimensões dos mesmos. A Figura 23 ilustra a disposição do ponteiro do relógio comparador perante a matriz de pixels. Observa-se que, em destaque encontram-se os alvos posicionados no ponteiro, assim como as dimensões nas direções diagonal (D_p), horizontal (C_p) e vertical (A_p), que representa a diagonal, o comprimento e a altura dos pixels, respectivamente. Na Figura 23 encontram-se destacados também os eixos referenciais adotados, onde o eixo de coloração azul clara localizado no canto superior esquerdo representa o eixo de referência da matriz de pixels (OXY), já o eixo de coloração verde representa o eixo fixo (axy), localizado sobre a origem ou base do ponteiro, que observa o movimento do alvo localizado no centro do ponteiro.

Figura 23– Representação do ponteiro do relógio comparador sobre a matriz de pixels.



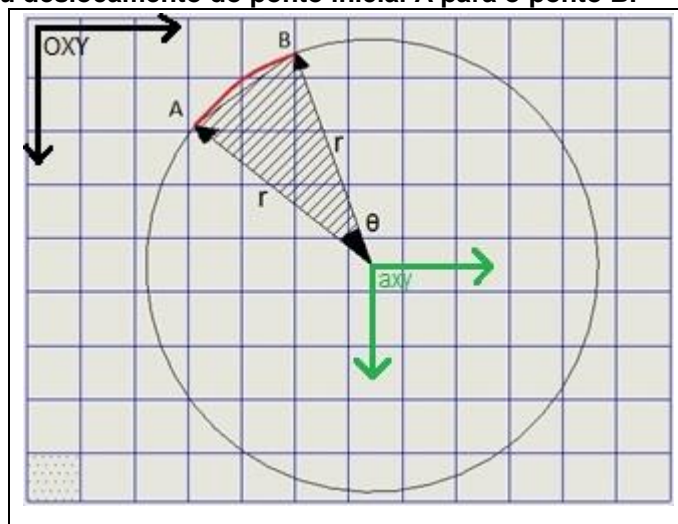
Fonte: Próprio Autor.

Levando em consideração os princípios do processamento digital de imagens, na presente metodologia, o alvo em questão deve se deslocar de um pixel a outro na matriz de pixels. Assim, o menor deslocamento que a metodologia é capaz de perceber é dado pela dimensão, na direção do deslocamento, de duas unidades de

pixels. Desta forma, para o desenvolvimento do cálculo da precisão da metodologia, deve-se analisar em um primeiro momento, a relação existente entre o deslocamento, referente a dois pixels do alvo localizado no centro do ponteiro do relógio, e o deslocamento angular desempenhado pelo ponteiro. E, posteriormente, relacionar este deslocamento angular com o deslocamento percebido na ponta de contato do relógio.

Primeiramente, analisou-se a relação existente entre o comprimento do arco desenvolvido pelo deslocamento do alvo, e o respectivo deslocamento angular do ponteiro. A marcação de dois alvos, sobre o ponteiro do relógio, permite a formação de um vetor que representa o mesmo no plano bidimensional da matriz de pixels. De maneira idêntica ao ponteiro, este vetor desenvolve um movimento de rotação ao redor de sua origem, e seu raio de giro é definido por seu comprimento (r_{AC}). O deslocamento deste vetor de uma posição qualquer (A) para outra posição (B) gera um arco de comprimento AB e um ângulo de revolução θ , conforme ilustra a Figura 24.

Figura 24– Representação espacial do vetor formado entre os dois alvos da imagem e seu deslocamento do ponto inicial A para o ponto B.



Fonte: Próprio Autor.

Segundo previamente discutido, o deslocamento mínimo deve alcançar o comprimento de dois pixels, o que representa um arco deve varrer a região de no mínimo dois pixels durante a rotação do vetor. Logo, foi considerada a distância de duas vezes o valor da diagonal de um pixel ($2 \cdot D_p$) para o comprimento do arco mínimo

capturado. Para o cálculo do ângulo θ , os conceitos de geometria analítica indicam a relação exibida na Equação 6.

$$\theta [^\circ] = \frac{\overline{AB} * 360}{(2 * \pi * r)} \quad (6)$$

A Equação 6 defini a precisão, em milímetros, da metodologia proposta e pode ser construída, a partir da relação existente na Equação 7 e do fator de escala do relógio comparador.

$$P [mm] = \left(\frac{(2 * D_p) * 360}{(2 * \pi * r)} \right) * \left(\frac{1}{360} \right) \quad (7)$$

Simplificando a equação 8, têm-se que, o calculo da precisão (P) pode ser determinado por:

$$P [mm] = \frac{(2 * D_p)}{(2 * \pi * r)} \quad (8)$$

Destaca-se que, todas as dimensões dos pixels são previamente calculadas durante a calibração a partir do bloco confeccionado para este fim.

Todo este processo de calibração, análise e estimativa da precisão foi desenvolvido com o intuito de agregar credibilidade à metodologia e respaldo para posterior confrontamento dos dados obtidos por meio da mesma.

3.3 Sensor de Proximidade

Esses sensores são equipamentos capazes de detectar a presença de objetos dispostos à sua face e mensurar a distância dos mesmos. Segundo Thomazini (2005), existem no mercado uma grande diversidade de sensores de proximidade, entre eles, pode-se citar os do tipo indutivo, capacitivo, ultrassônico ou óptico (fotoelétrico e infravermelho).

O princípio de operação do sensor de proximidade infravermelho baseia-se na detecção de objetos a partir da reflexão de raios de luz infravermelha. Feixes de luz infravermelha são emitidos e, quando um objeto entra em seu raio de alcance, o dispositivo mede os fótons (partículas de luz) que foram defletidos pelo material “invasor”, acionando, assim, um circuito elétrico (LAMB, 2015). Sensores de proximidade do tipo fotoelétrico operam de maneira semelhante aos do tipo infravermelho, porém neste caso um feixe de luz modulada é emitido na direção do alvo. Uma pequena parte da luz refletida atinge a face do receptor e o parâmetro utilizado para a medição é o ângulo de incidência em vez da quantidade de luz refletida (NETO, 2007).

O princípio de funcionamento dos sensores ultrassônicos está baseado na emissão de uma onda sonora de alta frequência, e na medição do tempo levado para a recepção do eco produzido quando esta onda se choca com um objeto capaz de refletir o som. Estes sensores emitem pulsos ultrassônicos ciclicamente. Quando um objeto reflete estes pulsos, o eco resultante é recebido e convertido em um sinal elétrico (ALCIATORE e HISTAND, 2014).

Os sensores de proximidade capacitivos são dispositivos capazes de detectar a presença de objetos plásticos, líquidos, orgânicos e também os metálicos detectados pelos sensores indutivos. Sensores capacitivos possuem um modo de funcionamento diferente dos demais, eles funcionam gerando um campo eletrostático criado por um oscilador controlado por capacitor, e detectando mudanças neste campo causadas por um alvo que se aproxima da face ativa (PESSOA e SPINOLA, 2014).

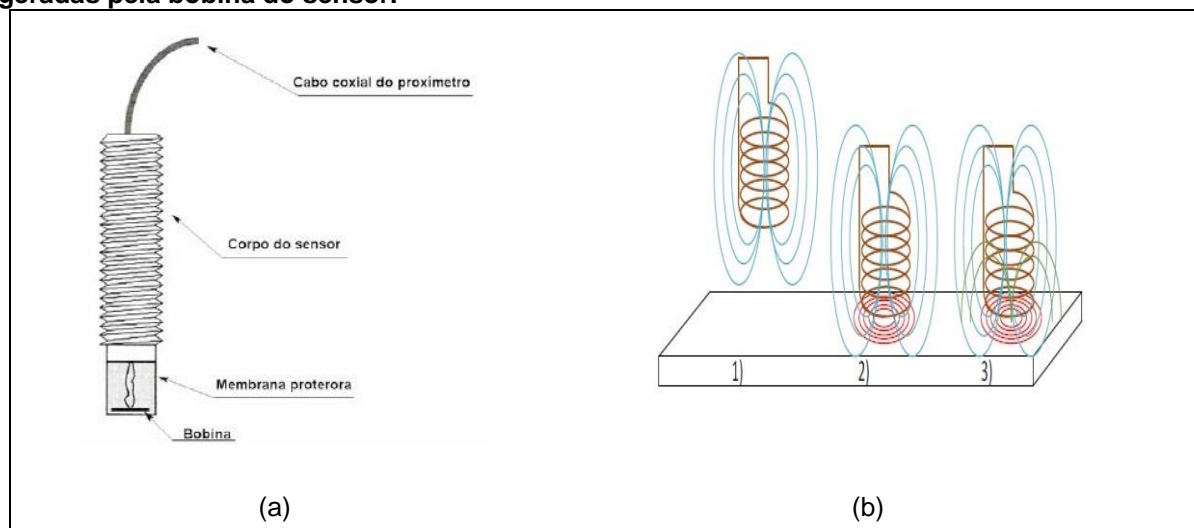
Os sensores de proximidade indutivos funcionam gerando um campo eletromagnético à sua frente. Quando um objeto-alvo metálico ferroso ou não ferroso penetra neste campo, e a perda de energia ocasionada pelas correntes de fuga no objeto resulta numa amplitude de oscilação menor (SCHEFFER, 2004).

Sensores de proximidade indutivos, também conhecidos como sensores de corrente parasita ou corrente de Foucault, são sensores sem contato usualmente utilizados no monitoramento de oscilações de eixos rotativo em relação a seus mancais de deslizamento (THOMAZINI, 2005).

Seu princípio de funcionamento remete à aplicação de uma corrente elétrica de alta frequência na bobina do sensor. Simultaneamente, um fluxo magnético de alta frequência desenvolve-se nesta mesma bobina e, ao aproximar uma peça metálica deste campo magnético, uma corrente parasita passa a circular no metal. A intensidade desta corrente parasita varia em função da distância entre o sensor e a superfície metálica, o que altera a impedância da bobina do sensor que alimenta um circuito detector. Este circuito detector, também chamado de condicionador de sinais, recebe o sinal da impedância da bobina e fornece um sinal de saída de tensão em volts (SCHEFFER, 2004).

A bobina, normalmente confeccionada em plástico ou material cerâmico, localiza-se na extremidade do transdutor e é conectada por dois fios pertencentes a um cabo coaxial que transmite sinal do transdutor para o condicionador. Este cabo coaxial deve ser eletricamente isolado e possuir comprimento estipulado de forma a manter uma impedância adequada, vale ressaltar que, caso o tamanho do cabo entre o transdutor e o condicionador for alterado a calibração do transdutor também será influenciada. A Figura 25 ilustra a construção e o funcionamento do sensor de proximidade.

Figura 25 - (a) Arranjo construtivo do sensor de proximidade. (b) Ilustração das linhas de campo geradas pela bobina do sensor.



Fonte: Felício, 2015.

De acordo com Thomazini (2005), os sensores de proximidade para medição de vibração apresentam proporcionalidade linear entre a tensão de saída e a distância de afastamento do sensor a uma superfície metálica. Ou seja, apresentam um trecho linear na curva de sensibilidade da tensão de saída em volts versus deslocamento em milímetros. Desta forma, instalando-se o sensor no ponto médio do trecho linear da curva de sensibilidade permite medir deslocamentos em ambos os lados da posição original de instalação. A Figura 26 ilustra um gráfico da curva de sensibilidade de um sensor de proximidade.

Figura 26 - Curva de sensibilidade do proximetro.



Fonte: Próprio Autor.

Esta relação fornecida pela curva de sensibilidade possui um papel de relevância para a calibração do sensor de proximidade perante o sistema que o mesmo estiver inserido. De modo que ao aplicar um método de aproximação linear por mínimos quadrados, pode-se extrair a sensibilidade do sensor, cujo valor é numericamente igual ao coeficiente da reta e sua unidade de medida é estipulada em função de tensão (V) e deslocamento (mm).

De acordo com Almeida (1990), a sensibilidade de cada proximetro é influenciada diretamente pelo material da superfície do objeto de estudo. Nas medidas, qualquer fenômeno que introduza distorções perante o condutor pode influenciar a sensibilidade do transdutor. A alteração de propriedades do material, como a resistividade elétrica, permeabilidade magnética, magnetismo residual ou concentração de tensão poderão introduzir ruídos ao sinal de saída. Desta forma,

todos esses aspectos devem ser levados em consideração durante qualquer operação que envolva este tipo de sensor.

3.4 Análise de Vibrações

O papel da análise de vibrações está relacionado com a obtenção dos sinais vibratórios da máquina, qualificá-la segundo a norma adotada, além de propor procedimentos para adequar os valores de pontos que excederem os limites toleráveis. Além de observar os limites, acompanhar a evolução dos níveis vibratórios representa um procedimento muito valioso. Isto porque, um aumento desses níveis caracteriza uma modificação na distribuição da energia vibratória do equipamento, que ocorre devido à sua deterioração. Assim, ao acompanhar a evolução do sinal vibratório em pontos determinados do equipamento, permite identificar o aparecimento de esforços dinâmicos novos que são indicadores de anomalias e defeitos de seu funcionamento (KURKA, 2015).

Na análise de vibrações é necessário realizar a aquisição e utilizar técnicas de processamento do sinal vibratório, para que seja possível relacionar as características deste sinal com o estado do equipamento. Técnicas como, a análise por nível global da vibração, análise espectral da vibração e média temporal síncrona são consideradas clássicas, mais utilizadas e de aceitação universal (ARATO, 2004).

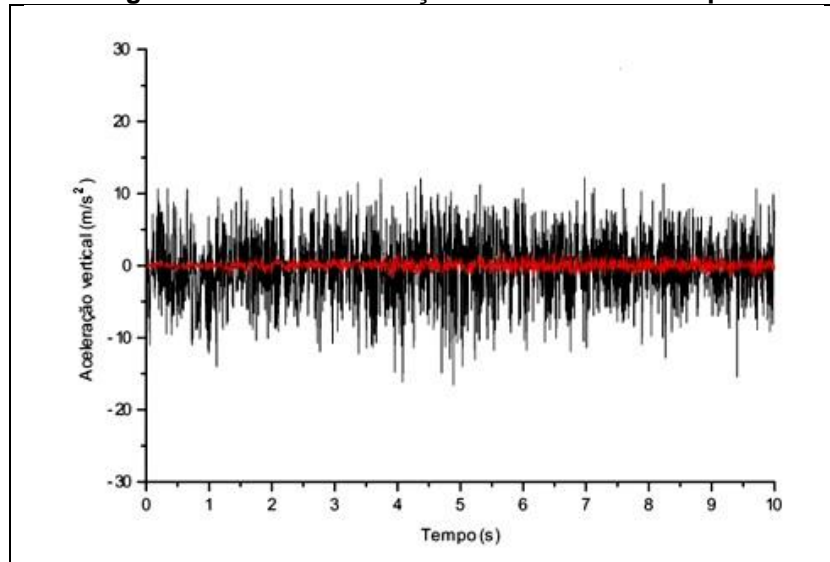
Os dados podem ser coletados com o equipamento em funcionamento, sem a necessidade de paradas desnecessárias. Através da análise de vibrações é possível detectar problemas como, falhas em rolamentos, folgas em mancais, desalinhamentos, desbalanceamentos e falhas em engrenagens.

No presente trabalho será utilizada a técnica de análise de vibrações durante experimentos realizados com uma máquina rotativa, pertencente à uma bancada de teste.

Os equipamentos, como já citado anteriormente, possuem em seu próprio funcionamento, características que provocam a vibração. Estas vibrações podem ser percebidas na forma de ruídos ou deslocamentos, onde suas amplitudes e faixas de frequências podem ser estimadas para que o equipamento opere em perfeitas condições de uso. Observa-se ainda que devido às características construtivas dos mais diversos equipamentos seu sinal vibratório real raramente se apresenta como

uma única senóide simples, e sim como sinais complexos (Figura 27), formado por várias frequências cuja origem pode ser relacionada a cada componente individual.

Figura 27– Sinal de vibração no domínio do tempo.



Fonte: Adaptado de Filho et al. 2003.

Deste modo, baseando-se somente na análise do gráficos dos sinais de vibração no domínio do tempo, torna-se muito difícil realizar alguma avaliação sobre o estado de operação da máquina rotativa. Uma solução para isso foi o estabelecimento de algumas medidas, as quais permitam o cálculo de valores globais para um movimento vibratório $x(t)$, em função do tempo. (ARATO, 2004). O parâmetro adotado para a análise dos índices de vibração foi o valor eficaz ou valor RMS:

Valor eficaz ou Valor RMS (Root Mean Square):

$$x_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T x^2(t) dt} \quad (9)$$

O método da análise do valor global de vibração consiste na monitoração de um valor global para o sinal de vibração, em pontos previamente determinados e considerados como críticos no equipamento. Este valor global representa um sinal de resposta da estrutura perante excitações dinâmicas originárias do funcionamento da máquina, que pode ser utilização para determinar seu estado geral.

Os valores medidos dos níveis de vibração de qualquer máquina ou equipamento podem acusar avarias em algum de seus componentes. (RAO, 2009).

Quando se busca identificar falhas em máquinas rotativas, uma mudança no sinal de vibração pode ser considerada uma mudança na condição da máquina. Uma ampla gama de anomalias e defeitos pode ser identificada assim como, problemas em mancais e rolamentos, desalinhamentos entre eixos, desbalanceamento de rotores, deteriorações na base, entre outros.

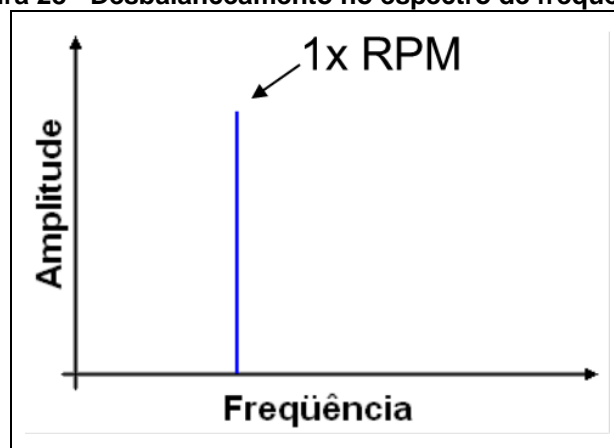
O desbalanceamento ocorre quando há uma distribuição desigual de massa em torno da linha central de rotação de um eixo, gerando cargas nos mancais como resultado das forças centrífugas. Sua ocorrência deve-se a presença de força radial proveniente da já citada massa (m) distribuída de forma desigual, a distância desta massa ao centro do rotor (r) e a velocidade de rotação (ω), a Equação 10, relaciona estas variáveis com a força radial (F_r).

$$F_r = m * r * \omega^2 \quad (10)$$

Vale ressaltar que, conforme se observa na Equação 10, a força responsável pela determinação do desbalanceamento é diretamente proporcional ao quadrado da velocidade de rotação do rotor, logo quanto maior for a velocidade mais notável será a presença do desbalanceamento.

O desbalanceamento pode ser identificado no espectro de frequências como um pico com valor igual ao valor de rotação do eixo, conforme Figura 28.

Figura 28 - Desbalanceamento no espectro de frequências



Fonte: Próprio Autor.

3.4.1 Medição de vibrações

A importância e necessidade de realização da medição e análise dos níveis vibratórios, de qualquer que seja a máquina ou equipamento, torna-se cada dia mais vital a toda linha de produção inserida na indústria. A partir da análise dos sinais medidos, vários tipos de falhas podem ser detectados, como por exemplo, rolamentos danificados ou enjambrados, eixos deformados plasticamente, desbalanceamento de rotores, dentes de engrenagens defeituosos, desalinhamento em acoplamentos, entre outras.

Nepomuceno (1989) enfatiza que a severidade das vibrações a baixas frequências é proporcional ao deslocamento das partes móveis, ou seja, os valores das amplitudes do deslocamento apresentam maior relevância quando se trata de medição em equipamentos que operam em baixas frequências. Por outro lado, destaca que a severidade em faixas de frequência média é proporcional à velocidade das partes móveis, que nos diz que ao se tratar de máquinas operando em médias frequências, o parâmetro que melhor retrata a condição das mesmas é a velocidade do movimento. E por fim, quando observamos operação em altas frequências, a severidade das vibrações do equipamento é mais bem representada pelo parâmetro de aceleração.

Assim, os parâmetros de medição podem ser representados: deslocamento [mm], velocidade [mm/s] e aceleração [mm/s² ou g].

Segundo Scheffer e Girdhar (2004), em intervalos de frequência de 1 a 10 Hz, considerados de baixa frequência, a medição pode ser mais eficaz, se analisarmos o deslocamento da vibração existente. Em se tratando da faixa de frequência de 10 a 1000 Hz, a medição pelo parâmetro da velocidade torna-se mais adequada. E por fim, quando se analisa faixas de frequências maiores que 1000 Hz o parâmetro mais relevante é o da aceleração.

Com isso, o instrumento de medição a ser utilizado depende da quantidade medida, podendo ser denominado de vibrômetro, velocímetro acelerômetro, medidor de fase ou medidor de frequência. Sendo que, para Rao (2009) as considerações mais relevantes para a determinação do tipo de instrumento de medição de vibração são:

- As faixas esperadas das frequências e amplitudes.
- O tamanho das máquinas e estruturas em análise.

- As condições de operação das máquinas e equipamentos envolvidos.
- O tipo de processamento de dados utilizado.

Duas principais formas de abordagem deste método, para a avaliação da vibração em máquinas rotativas são: em uma primeira maneira, a avaliação da severidade de vibração por meio da medição da vibração absoluta sobre partes não rotativas, e de uma segunda maneira, a avaliação das condições da máquina por meio da medição direta da oscilação dos eixos. A opção por adesão de uma ou outra forma depende principalmente, do tipo e da complexidade da máquina, assim como de sua velocidade de operação e suas fontes excitadoras elementares (KURKA, 2015).

De uma maneira geral, utiliza-se a medição da vibração absoluta sobre partes não rotativas em maquinários que possuem múltiplas fontes de agentes excitadores, tais como bombas de engrenagens, compressores, transmissão de engrenagens. Arato (2004) destaca que, em máquinas rotativas com maior rigidez, tais como motores elétricos, bombas hidráulicas e conjunto turbo geradores, o método também pode ser empregado.

O modo de medição direta da oscilação do eixo costuma ser aplicado para máquinas rotativas simples, com mancais de deslizamento e disposição do conjunto rotor-eixo com eixos relativamente longos, caracterizando assim uma menor rigidez (SCHEFFER e GIRDHAR, 2004). Arranjo bastante encontrado em máquinas hidráulicas e geradores de grande porte, assim como em turbinas a gás ou vapor.

3.4.2 Avaliação da severidade das vibrações

Os valores medidos dos níveis de vibração de qualquer máquina ou equipamento podem acusar avarias em algum de seus componentes. (RAO, 2009).

Para determinar se tais valores indicam alguma anomalia na máquina, os mesmos podem ser submetidos à comparação com tabelas de referência. Os valores representados nestas tabelas, normalmente obtidos com base em médias estatísticas de milhares de casos, são indicados por agências de normalização como ABNT, ISO e VDI.

Segundo Arato (2004), uma alternativa, que também pode ser adotada para a avaliação das condições da máquina, a partir de suas vibrações, seria a comparação dos níveis vibratórios medidos com os recomendados pelo fabricante. Ou ainda, a avaliação da condição utilizando curvas de tendência, que nada mais é, do que, o estudo da curva formada sobre os pontos de medição do gráfico que relaciona os valores com o intervalo de tempo das medições efetuadas.

Na aplicação do critério de comparação com referências estipuladas por meio de normatização, são encontradas tabelas que definem faixas de valores indicativos da severidade de vibração das máquinas e equipamentos. Alguns fatores como o porte, a montagem e velocidade de operação são considerados para estipularem tais tabelas de comparação, e suas faixas de valores definem o critério de aceitação ou não dos níveis vibratórios obtidos por meio de medição. (NEPOMUCENO, 2011).

Conforme as normas ISO e a ABNT, uma máquina pode ser classificada em quatro níveis de severidade. (ARATO, 2004):

1º) Nível A: Boas condições. Geralmente encontradas em máquinas novas ou revisadas.

2º) Nível B: Aceitável para operação continuada. Normalmente encontrada em máquinas com manutenção eficiente e operada adequadamente.

3º) Nível C: Limite tolerável. A operação deve ser monitorada e continuar por um período limitado, a programação de parada deve ser imediata e o reparo/ajuste realizado o mais rápido possível.

4º) Nível D: Intervenção imediata. A severidade pode ser considerada maléfica ao equipamento, a interrupção da operação deve ser imediata para a realização da manutenção corretiva.

A norma ISO 10816-3 trata da avaliação de severidade em máquinas industriais com potência abaixo de 15 kw e velocidades nominais entre 120 e 15000 rpm, através da medição em partes não rotativas, em pontos definidos em função da localização de seus mancais. Tais pontos são determinados nas três direções: radial vertical (V), radial horizontal (H) e axial (A), e devem sempre estar posicionados em partes rígidas, evitando chapas ou tampas. Quanto aos suportes dos equipamentos, a norma, também prevê uma classificação quanto à sua flexibilidade, sendo divididos em elásticos ou rígidos. São considerados rígidos, os suportes que possuem frequência natural superior a 25% a principal frequência de excitação da máquina. Caso

apresentem valores inferiores são chamados de elásticos. A Figura 29 representa os limites mais utilizados na indústria.

Figura 29– Grau de severidade em máquinas.

Sub-grupo do equipamento	Zona de avaliação	Deslocamento (RMS)	Velocidade (RMS)
		[μm]	[mm/s]
Rígido	A		
	B	11	1.4
	C	22	2.8
	D	36	4.5
Elástico	A		
	B	18	2.3
	C	36	4.5
	D	56	7.1

Fonte: ABNT ISO-10816-3 (2014).

Vale ressaltar que podem existir exceções às normas, principalmente se a medição for realizada em equipamentos alternativos. Assim, em alguns casos, a vibração pode apresentar níveis considerados não permissíveis mesmo quando o equipamento opera normalmente. Nestes casos recomenda-se a utilização de tabelas dos fabricantes ou até mesmo experiências anteriores.

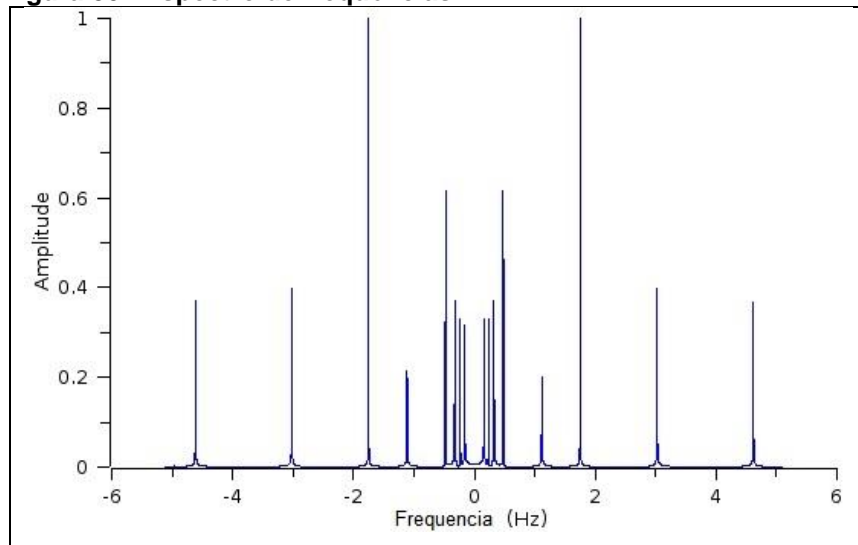
3.4.3 Análise espectral

Na seção anterior, pode-se perceber que o método de medição a análise do nível global das vibrações apresentou-se como um excelente procedimento para evitar situações críticas de vibrações. Entretanto, não permite ao profissional responsável, realizar um diagnóstico preciso e mais apurado, a fim de identificar qual avaria existente na máquina está provocando o aumento de severidade, revelado pelo aumento da vibração. Assim, torna-se possível sabermos que existe um problema, mas não especificar com clareza sua origem.

O espectro das vibrações relaciona os valores das amplitudes de vibração com suas respectivas frequências, permitindo a identificação da origem do defeito que provoca o aumento da severidade do problema existente. A obtenção do espectro de vibração pode ser realizada, entre outras formas, por meio do emprego do algoritmo conhecido por FFT (*Fast Fourier Transform*) ou ainda com a utilização de filtros do tipo passa-banda reguláveis. Na literatura, Arato (2004), destaca e descreve passo a passo a obtenção por meio de filtros.

Deste modo, as diferentes fontes de excitação, relacionadas com valores de suas amplitudes, formam um gráfico denominado por diversos autores de assinatura espectral da máquina. A Figura 30 ilustra um exemplo de espectro de frequências.

Figura 30– Espectro de frequências.



Fonte: Próprio autor.

A análise do espectro de frequência permite a identificação das características de vibração de cada componente do sistema rotativo de maneira individual, associando os picos de frequências presentes no mesmo com a frequência de operação de cada componente da máquina rotativa.

Dessa forma é possível comparar espectros de frequência de máquinas perante a análise dos picos presentes em seu espectro, identificar as alterações, relacioná-las com as frequências características de falhas dos diversos elementos de máquinas, e assim, proceder ao diagnóstico.

Destaca-se que o escopo do presente trabalho fundamenta-se no desenvolvimento de uma metodologia alternativa para o processo de aquisição dos

sinais de vibração, o que possibilita a sua utilização em estudos futuros acerca da avaliação do critério de severidade dos índices coletados em máquinas rotativas.

4 TESTES EXPERIMENTAIS E RESULTADOS

O presente trabalho foi desenvolvido no âmbito do Laboratório de sistemas dinâmicos da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, onde foram realizadas todas as aquisições e testes experimentais em bancadas de testes, utilizando em primeiro momento uma câmera digital para capturar imagens dos pontos de interesse (alvos) da estrutura. Posteriormente, os dados coletados foram processados computacionalmente, e assim estimados os parâmetros de deslocamento em pontos pré-determinados da estrutura de testes. Em um segundo momentos os resultados da presente técnica serão confrontados com os obtidos através de técnicas já consagradas na literatura, e utilizadas como padrão de referência. Deste modo, o deslocamento identificado, por meio da presente técnica e a de referência, serão confrontados e analisados. Serão analisados os resultados adquiridos de parâmetros como a amplitude máxima e frequência dos deslocamentos analisados.

Destaca-se que, como a presente metodologia utiliza câmeras digitais para a identificação do movimento, e a resolução das imagens é um parâmetro fundamental a ser analisado para que seja possível realizar corretamente a coleta de dados, assim como, a taxa de amostragem, que determina o número de quadros por segundo. O modelo de câmera utilizada nas aquisições foi o EXILIM EX-ZR700, e devido as suas características construtivas, a mesma é limitada às combinações destes dois parâmetros, ou seja, para cada taxa de aquisição existe associada a ela uma diferente resolução. A seleção destas combinações pode ser executada com o ajuste denominado de 'Qualidade do Filme', existente nas configurações da câmera digital. A Tabela 1 relaciona todas as configurações da qualidade do filme possíveis para o modelo de câmera utilizado.

Tabela 1– Configurações da qualidade do filme.

Qualidade do Filme	Taxa de Fotogramas (fps)	Tamanho da imagem (Pixels)
FHD	30	1920x1080
HS1000	1000	224x64
HS480	480	224x160
HS240	240	512x384
HS120	120	640x480
HS30-240	30-240	512x384
HS30-120	30-120	640x480
STD	30	640x480

Assim, um dos fatores que influencia na precisão na identificação de alvos está diretamente relacionado com a resolução da imagem, também chamada de tamanho da imagem em pixels, pois estas imagens digitalizadas são reconhecidas computacionalmente, na presente metodologia, na forma de matrizes bidimensionais. Desta forma, cada matriz bidimensional representa uma imagem do vídeo, onde cada pixel da imagem é representado por um elemento dentro desta matriz. Assim, a posição do alvo é identificada de acordo com o pixel que contém o ponto do centroide e seu deslocamento é detectado quando a variação temporal de sua posição e consequentemente, o centroide é encontrado em outro pixel. Deste modo a percepção de movimento da presente metodologia realiza-se pixel-a-pixel e, portanto, sua precisão varia de acordo com as dimensões de cada pixel.

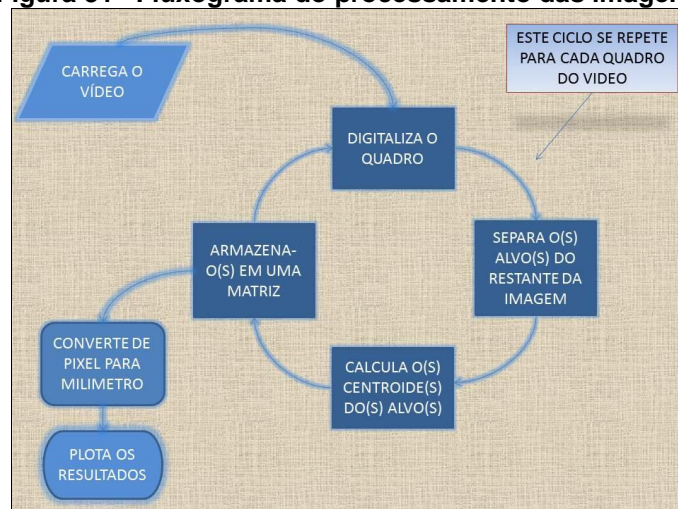
Devido às limitações operacionais da câmera utilizada, foi desenvolvido um procedimento individualizado para a identificação de pequenos deslocamentos, que podem ser inferiores às dimensões de cada pixel. Para isto, utilizou-se de um equipamento de precisão denominado relógio comparador, que foi acoplado à estrutura em estudo de modo que a ponta de contato do mesmo esteja posicionada no ponto definido para a medição da estrutura. Assim, o deslocamento do alvo posicionado na estrutura é transferido para a haste do relógio comparador e identificado em seu visor, o qual é definido por um ponteiro que desenvolve um deslocamento angular sobre uma escala em milímetros. Esta operação gera um efeito de amplificação sobre o deslocamento, uma vez que para cada 0.01 mm de deslocamento percebido pela ponta de contato do relógio, seu ponteiro realiza um

deslocamento angular de 3.6 graus no plano bidimensional XY, conforme especificações fornecidas pelo fabricante do equipamento, conforme evidenciado na seção 3.2.4. Desta forma, a presente técnica encontra-se pautada no monitoramento do deslocamento angular realizado pelo ponteiro do relógio comparador no plano bidimensional XY, caracterizando o mesmo como o alvo durante o processamento das imagens.

Após definida as condições de filmagem dos alvos, o vídeo é transferido ao computador para que as imagens sejam processadas. Onde, cada imagem, também chamado de quadro, do vídeo é digitalizada e reconhecida computacionalmente como uma matriz bidimensional, referente à matriz de pixels que compõe a imagem. Logo em seguida, são aplicados filtros e técnicas como a erosão e dilatação, a fim de realizar a identificação e separação dos alvos perante a cena total da imagem. Após o reconhecimento dos alvos em estudo, o algoritmo calcula o centroide referente a seu formato geométrico e defini este ponto como a referência para a posição dos mesmos. E, por fim as posições dos alvos são armazenadas em um vetor. Tais posições são inicialmente, registradas em função de pixels e, após a calibração e a determinação das dimensões dos pixels, transformada para unidades de comprimento (neste caso milímetros).

Este procedimento é repetido para cada quadro/imagem do filme gravado. O fluxograma da Figura 31 ilustra processamento computacional das imagens.

Figura 31– Fluxograma do processamento das imagens.



Fonte: Próprio Autor.

Para fins de comparação e validação da metodologia, foi utilizado como padrão de referência dados coletados a partir de um sensor de proximidade convencional, também chamado de proximímetro, do tipo indutivo. O processo de obtenção e armazenamento dos sinais deste sensor, realizou-se através do software comercial LabView, para posteriormente serem confrontados com a metodologia proposta. A validação e comparação de dados ocorreram no âmbito da análise dos gráficos de deslocamento por tempo e a análise espectral dos picos de frequência e amplitude, provenientes do processamento dos dados adquiridos por meio das duas técnicas, a convencional e a proposta.

Nas seções seguintes encontram-se relacionados os desdobramentos referentes à validação inicial da metodologia proposta, onde são detalhados todos os processos de calibração dos sensores utilizados e a aquisição dos sinais, assim como, a discussão dos resultados obtidos. As condições dos testes foram definidas de acordo com dois limítrofes, o primeiro definido na frequência de 1 Hz e deslocamento menor que 1 milímetro, e o segundo estipulado na frequência de 15 Hz e deslocamento menor que 0.1 milímetro. Assim, nesta fase do trabalho foram analisados os resultados obtidos e realizada a averiguação quanto à eficácia da metodologia para fins de validação da mesma. Posteriormente, a técnica foi submetida a teste com uma máquina rotativa, disposta em uma bancada didática, a fim de realizar sua aplicação no procedimento de identificação e aquisição dos sinais referentes a vibração existente durante operação da máquina.

4.1 Experimento 1 – Aquisição de dados de deslocamento de um *Shaker*

O procedimento experimental consiste na aquisição temporal de dados, do deslocamento desenvolvido na haste de um *Shaker* Eletromecânico. Tal equipamento foi utilizado devido ao fato de permitir a realização de deslocamentos controlados por meio de um gerador de sinais. O sinal de entrada fornecido ao *Shaker* foi do tipo senoidal com frequências de 1 Hz. A Tabela 2 relaciona os equipamentos utilizados nos experimentos.

Tabela 2– Equipamentos utilizados nos experimentos com o Shaker.

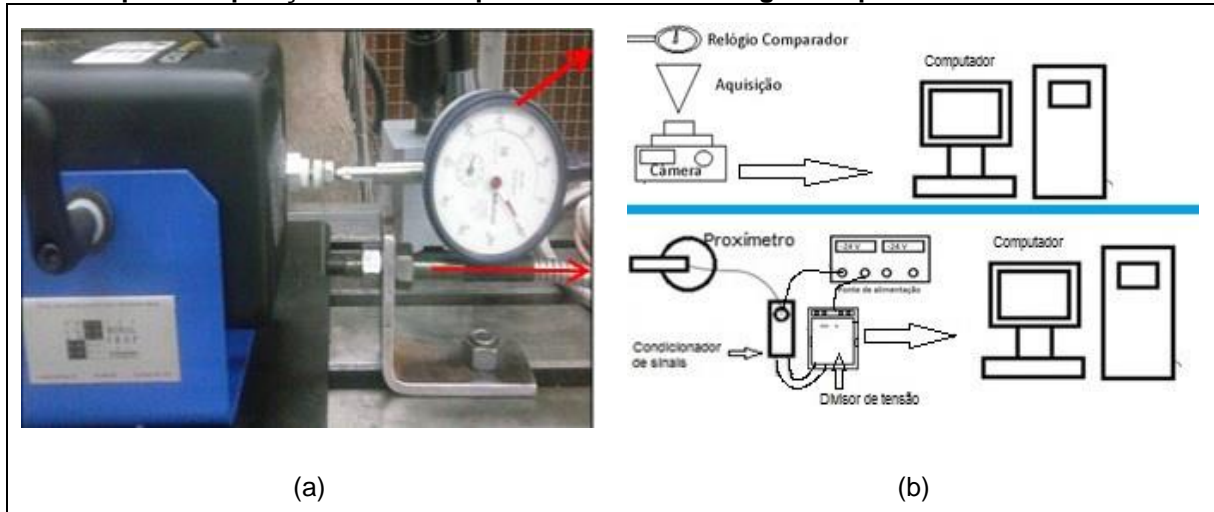
Itens	Especificações
Shaker Eletromecânico	Modelo K2007E01. Fabricante: The Modal Shop(PCB). Tensão de entrada: 0-1V AC. Eficiência: 92%.
Sistema de aquisição	Modelo: Quattro. Fabricante: DataPhysics.
Relógio Comparador	Modelo: 2046S. Fabricante: Mitutoyo.
Base Magnética	Modelo: 7032B. Fabricante: Mitutoyo.
Sensor de proximidade	Modelo: 98052. Tipo: Indutivo. Fabricante: Vibrocontrol.
Câmera Digital	Modelo: EXILIM EX-ZR700. Fabricante: CASIO.
Sistema de aquisição	Modelo: cDaq-9172. Fabricante: National Instruments.
Condicionador de sinais	Modelo: GS5001. Fabricante: Vibrocontrol.
Fonte eletrônica	Modelo: PS-6000. Fabricante: Icel.
Microcomputador	Intel I5 – 4gb Memória Ram.

A aquisição de dados foi realizada simultaneamente através da captura de imagens e aquisição de sinais adquiridos por meio de um sensor de proximidade, ambos configurados sob a mesma taxa de aquisição e quantidade de amostras.

Para a captura das imagens foi utilizado uma câmera digital modelo EXILIM do fabricante Casio, previamente configurada para uma taxa de captura de quadros de 120 fps, resolução de 640 pixels nas linhas horizontais por 480 pixels nas linhas verticais de cada quadro, e tempo total de vídeo de 10 segundos e, posicionada a uma

distância de 250 mm frente ao aparato experimental exposto na Figura 32a. Vale ressaltar que, perante o processamento das imagens, os pontos definidos como alvos são delimitados pelas regiões de coloração vermelha do ponteiro do relógio comparador.

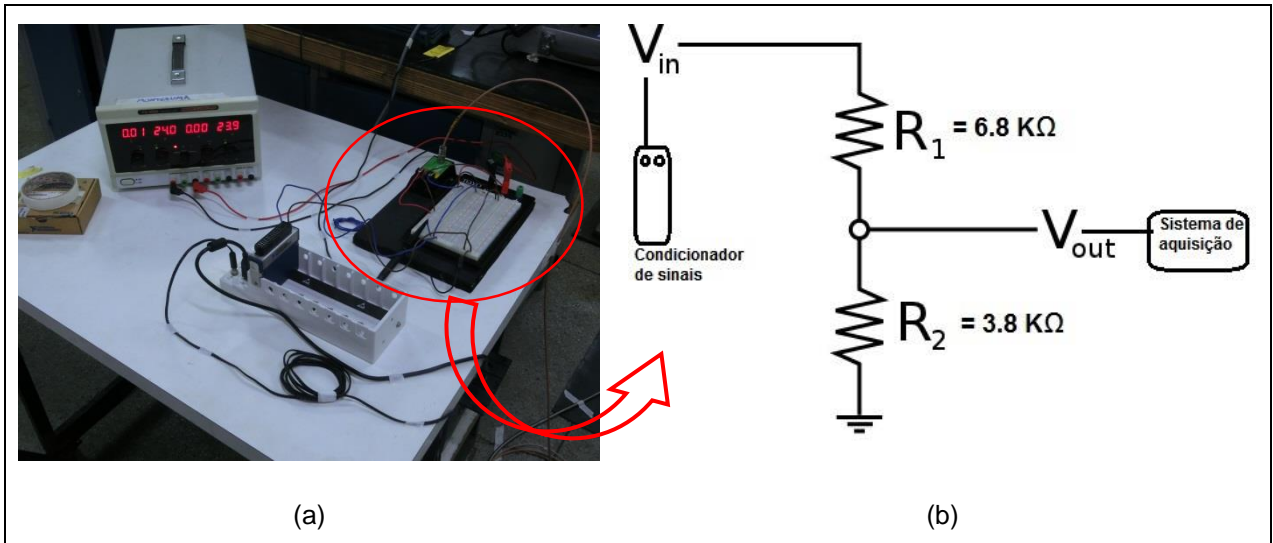
Figura 32 - Arranjo Experimental. (a) Shaker, Relógio Comparador e Proxímetro; (b) Esquema utilizado para a aquisição dos sinais por meio da câmera digital vs proxímetro.



Fonte: Próprio Autor.

O sensor de proximidade utilizado foi o modelo 98052, do fabricante Vibrocontrol, que opera em conjunto a um condicionador de sinais. Os sinais fornecidos pelo sensor/condicionador foram submetidos a um circuito elétrico divisor de tensão (Figura 32b), a fim de ajustar seus limites de acordo com a faixa de tensão suportada pelo sistema de aquisição, utilizado na coleta e armazenamento dos mesmos. O sistema de aquisição utilizado foi o modelo cDaq-9172, do fabricante National Instruments, que opera em conjunto com o módulo 9205 do mesmo fabricante, que permite que sejam configurados os parâmetros de aquisição, como taxa de aquisição e quantidade total de amostras, por meio de uma implementação por diagrama de blocos no software comercial LabView. A Figura 32b ilustra o esquema de tratamento e aquisição dos sinais do sensor de proximidade e o controle de operação do *Shaker*. Já a Figura 33a representa em destaque o circuito divisor de tensão a que foi submetido o sinal de saída do condicionador de sinais ligado ao sensor de proximidade.

Figura 33- Sistema para aquisição dos sinais do proximetro. (a) Fonte, placa de aquisição, condicionador de sinais e circuito divisor de tensão. (b) Detalhe do circuito divisor de tensão utilizado.



Fonte: Próprio Autor.

O circuito divisor de tensão foi construído a partir da associação em série de dois resistores R_1 e R_2 com resistências de 6.8 e 3.8 $K\Omega$, respectivamente. A partir da configuração detalhada na Figura 33b, vale ressaltar que, a tensão de entrada V_{in} foi definida como a tensão fornecida pelo condicionador de sinais do sensor e a tensão de saída V_{out} representa a tensão fornecida ao sistema de aquisição. Desta forma, de acordo com pressupostos da Lei de Ohm, a tensão de saída V_{out} do circuito pode ser determinada a partir da Equação 8

$$V_{out} = V_{in} * R_2 / (R_1 + R_2) \quad (\text{Eq. 11})$$

Assim, considerando que o sinal fornecido pelo condicionador (V_{in}) é da ordem de (-4) a (-24) volts, a tensão de saída do circuito (V_{out}), limita-se à faixa de (-1.44) a (-8.60) volts adequando-se assim aos limites de (-10) a (+10) volts do sistema de aquisição.

4.1.1 Calibração do Sensor de Proximidade com haste do Shaker

Conforme exposto na seção 3.4, as propriedades de cada diferente tipo de metal exercem influência direta na sensibilidade do sensor de proximidade. Deste modo, torna-se necessária a realização do procedimento de calibração do sensor para sua correta utilização.

O processo de calibração do sensor de proximidade foi desenvolvido a partir da utilização de máquina fresadora universal da marca Clark, modelo FU2, capaz de realizar pequenos incrementos de deslocamentos controlados com precisão centesimal. Conforme é evidenciado pelas Figuras 34a,b o aparato experimental de calibração do sensor é composto pelos seguintes equipamentos: *Shaker* eletromecânico, haste de contato do *Shaker*, *proxímetro* e, dispositivo de fixação para o *proxímetro*,

Figura 34– (a) Aparato para calibração do sensor de proximidade. (b) Detalhe do shaker e sensor.



Fonte: Próprio Autor.

Desta forma, o sensor de proximidade manteve-se fixo por meio de uma base magnética e o objeto a ser medido foi posicionado sobre a plataforma da fresadora.

A metodologia adotada consiste em, inicialmente, posicionar o sensor face ao material a ser calibrado, de maneira que o mesmo se aproxime o máximo possível do sensor, uma vez que nesta condição a tensão fornecida pelo mesmo seja próxima de zero. Em seguida são realizados deslocamentos controlados e divididos em incrementos de 0.250 mm, com a finalidade de afastar o objeto do sensor. Para cada

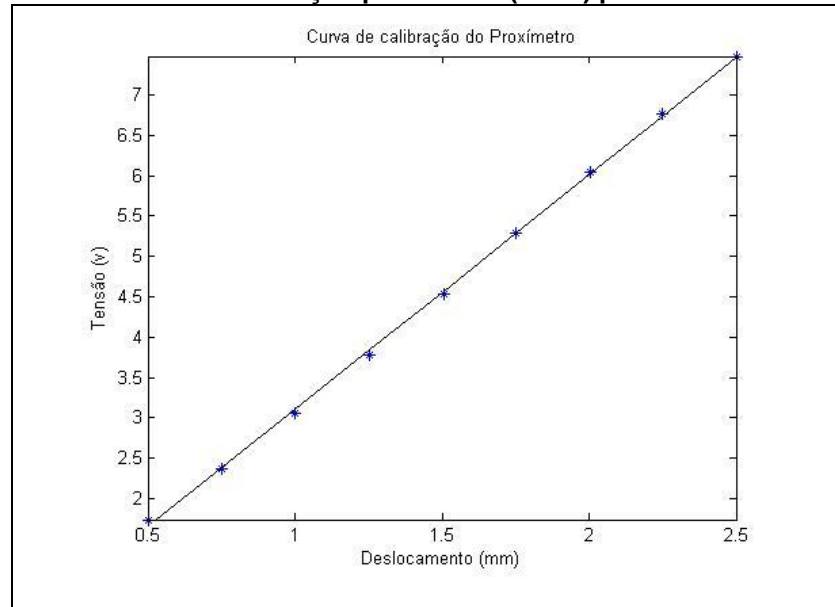
deslocamento, o sensor forneceu um diferente valor de tensão. Como a faixa de medição do sensor, fornecido pelo fabricante encontrava-se entre -4 a -24 volts, e conforme previamente exposto, o sistema foi submetido a um circuito divisor de tensão que reduziu em 2.80 vezes a tensão emitida pelo sensor, apenas os valores de tensão entre -1.44 e -8.60 volts foram utilizados para o cálculo da sensibilidade do mesmo. Os valores de tensão emitidos pelo sensor e seus respectivos deslocamentos, assim como a sensibilidade instantânea podem ser apreciados na Tabela 3. Estes valores foram armazenados em formato de texto (.txt), via *software LabView* a cada incremento aplicado no deslocamento pela máquina fresadora.

Tabela 3– Dados da calibração do sensor.

Incrementos (milímetros)	Tensão (Volts)
0.500	-1.742
0.750	-2.378
1.000	-3.064
1.255	-3.777
1.505	-4.542
1.750	-5.284
2.005	-6.040
2.250	-6.771
2.500	-7.476

Nota-se com base na tabela 3 que a distribuição dos pontos experimentais, como era esperada, se aproxima de reta linear. Assim, o valor da sensibilidade foi aproximado a coeficiente angular de uma reta, que foi determinada pelo método de mínimos quadrados, e atingiu o valor de 2.904 V/mm, cujo desvio padrão dos pontos em relação a curva foi de 0.0493. A reta aproximada, bem como a distribuição dos pontos pode ser visualizada na Figura 35.

Figura 35– Curva de calibração proxímeter (MMQ) posicionado no shaker.



Fonte: Próprio Autor.

Nota-se na Figura 35, que entre o intervalo de 0,5 a 2,5 milímetros a resposta em tensão do sensor tem caráter linear, isto define o chamado ‘*gap*’ do sensor, o que significa que o ajuste da distância, entre a face do sensor e a estrutura, deve obedecer aos limites deste intervalo. Vale ressaltar que o processo de calibração desempenha função de caráter essencial para a correta medição efetuado pelo mesmo.

4.1.2 Resultados para teste com frequência de 1 Hz.

Nesta seção encontram-se expostos os resultados obtidos para o experimento realizado com o Shaker eletromecânico, configurado para um deslocamento com frequência de oscilação de 1 Hz e forma de onda do sinal do tipo senoidal. A taxa de aquisição para este teste foi definida em 120 amostras por segundo com um total de 1200 amostras coletadas, o que implica em um tempo total de aquisição de 10 segundos. A câmera digital teve suas configurações realizadas via menu de interface de operação ao usuário, já o sensor de proximidade teve seus parâmetros de aquisição configurados via programação por diagrama de blocos através do software *LabView*.

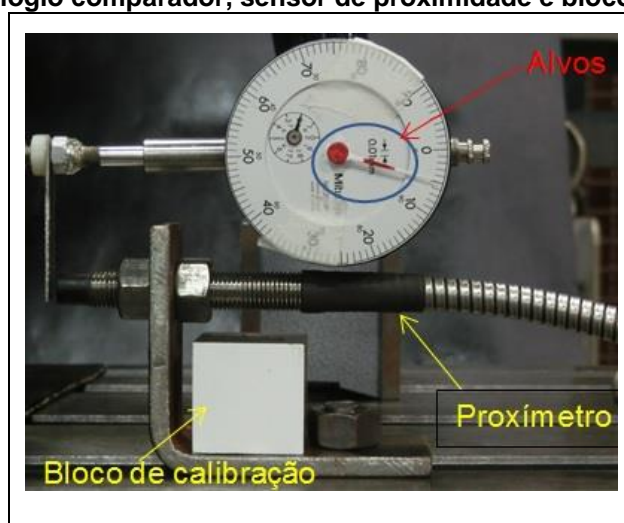
As informações inerentes ao processo de calibração, perante a aquisição de dados por meio da câmera digital tiveram seus parâmetros calculados, a partir das relações apresentadas nas seções 3.2.5 a 3.2.6, via algoritmo computacional

baseado na resolução das imagens, que para este caso apresenta 640 pixels em suas linhas horizontais e 480 pixels em suas linhas verticais. Assim, as dimensões dos pixels foram estabelecidas em 0.2453 milímetros de comprimento na direção horizontal, 0.2871 milímetros na direção vertical e 0.3776 milímetros na direção diagonal. A norma do vetor, que representa o ponteiro do relógio, foi calculada em 15.83 milímetros e, de acordo com a Eq. 8 a precisão da metodologia atingiu o valor de 0.0076 milímetros.

Já para os dados provenientes da calibração do sensor de proximidade, o parâmetro utilizado foi sua sensibilidade, expressa em unidade de tensão elétrica (volts) por unidades de comprimento (milímetros), previamente calculada no item 4.1.1.

A Figura 36 apresenta em detalhes o relógio comparador com os alvos definidos, o sensor de proximidade e o bloco padrão utilizado par a calibração das imagens.

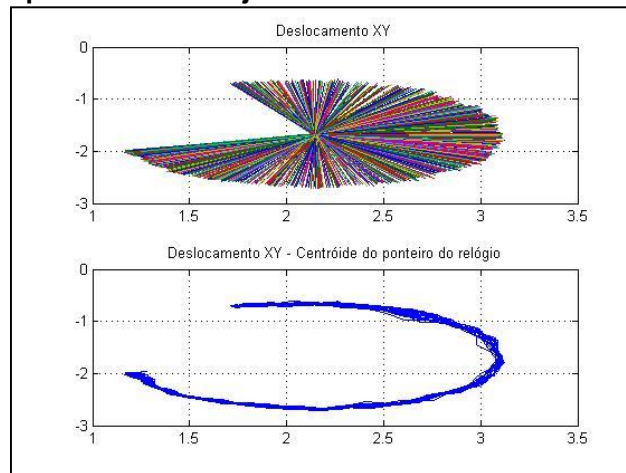
Figura 36– Relógio comparador, sensor de proximidade e bloco de calibração.



Fonte: Próprio Autor.

Os gráficos da Figura 37 exibem a posição do ponteiro do relógio comparador e a trajetória do ponto de referência adotado, no decorrer do deslocamento. O ponto de referência, conforme evidenciado pela Figura 36, foi posicionado na metade do comprimento total do ponteiro.

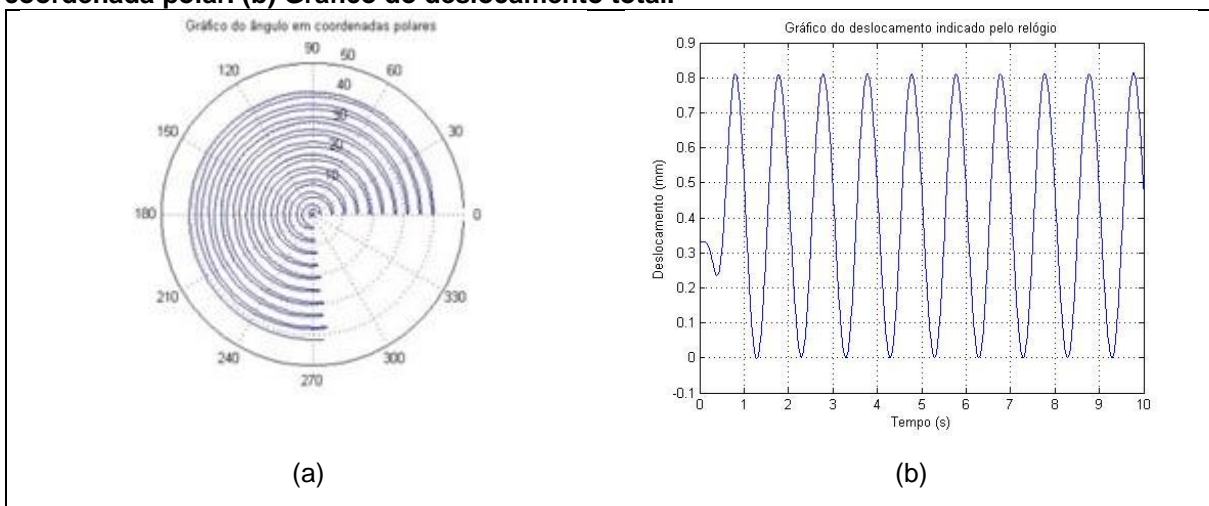
Figura 37 - Identificação do ponteiro do relógio comparador - vetores referentes à posição do ponteiro do relógio comparador e sua trajetória.



Fonte: Próprio Autor.

A posição que o ponteiro do relógio assume ao longo do tempo foi monitorada de acordo com o ângulo extraído das coordenadas polares do vetor que o representa analiticamente no espaço (Figura 38a). De posse deste ângulo e do fator de escala do relógio comparador, obtido na seção 3.2.6, pode-se calcular o deslocamento total no decorrer do tempo (Figura 38b).

Figura 38: Dados obtidos com o processamento das imagens. (a) Gráfico do Ângulo em coordenada polar. (b) Gráfico do deslocamento total.



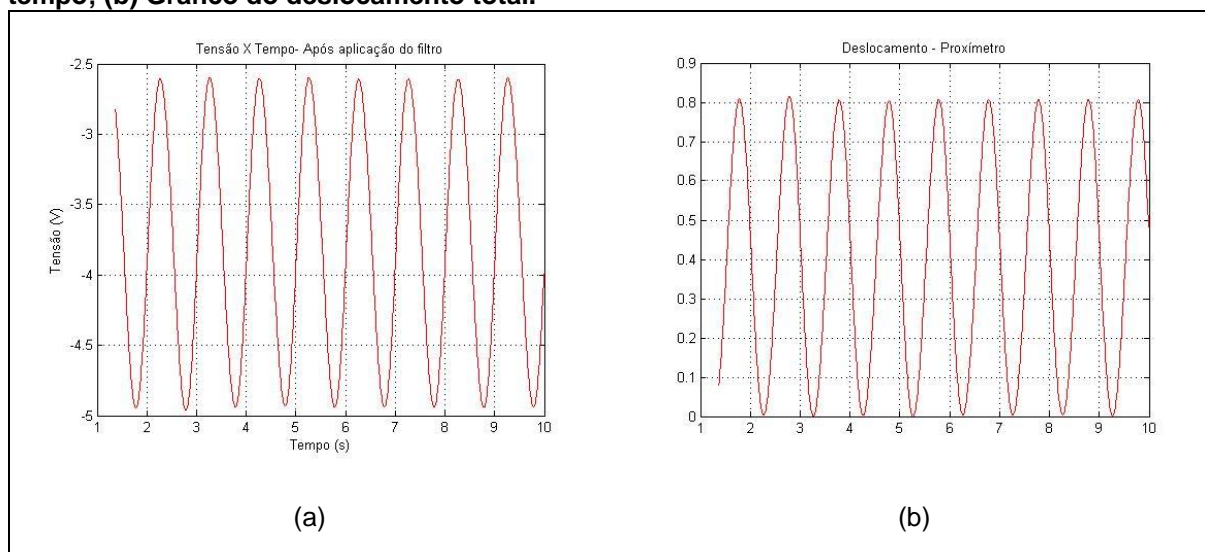
Fonte: Próprio Autor.

Durante a aquisição dos sinais do sensor de proximidade o mesmo foi conectado, via cabo coaxial BNC com proteção antirruído, a um condicionador de

sinais alimentado por uma tensão de -24 Vcc fornecida a partir de uma fonte elétrica. O sinal de resposta, fornecido pelo condicionador em forma de tensão elétrica na faixa de -4 a -24 Vcc, recebe o tratamento descrito no item 4.1 por meio do circuito divisor de tensão e por fim é enviado à placa de aquisição da National Instruments. A placa de aquisição comunica-se via cabo usb com um micro computador, onde por meio do software *Labview* pode-se realizar os ajustes pertinentes à análise em tempo real dos sinais e seu arquivamento para posterior processamento em ambiente *MatLab*.

Na Figura 39 notam-se os valores de tensão (Figura 39a) e deslocamento (Figura 39b) em função do tempo, obtidos por meio do sensor de proximidade. Os valores de deslocamento total foram obtidos de posse do sinal da variação de tensão fornecida pelo sensor e sua respectiva sensibilidade de 2.904 V/mm, calculada a partir do processo prévio de calibração, conforme evidenciado na seção 4.1.1.

Figura 39 - Sinais coletados no Sensor de Proximidade. (a) Gráfico da tensão em função do tempo; (b) Gráfico do deslocamento total.

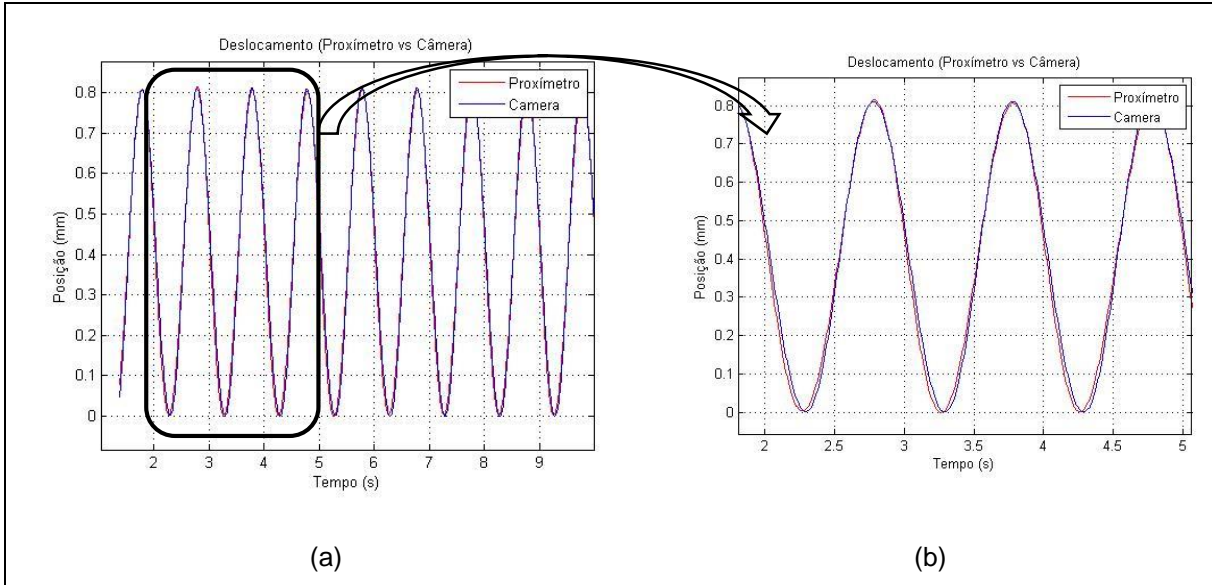


Fonte: Próprio Autor.

Já nos gráficos das Figuras 40a,b são exibidos os resultados obtidos entre os dois métodos para o deslocamento em função do tempo. O sinal representado pela coloração vermelha expõe o resultado obtido por meio da aquisição com sensor de proximidade, enquanto o sinal obtido por meio da aquisição de imagens, a partir da câmera, está representado com a coloração azul. No detalhe da Figura 38b encontra-se o mesmo deslocamento no intervalo de tempo entre 2 e 5 segundos, onde pode-

se visualizar a forma de onda, assim como, a superposição entre as linhas representativas dos diferentes métodos para a identificação do deslocamento.

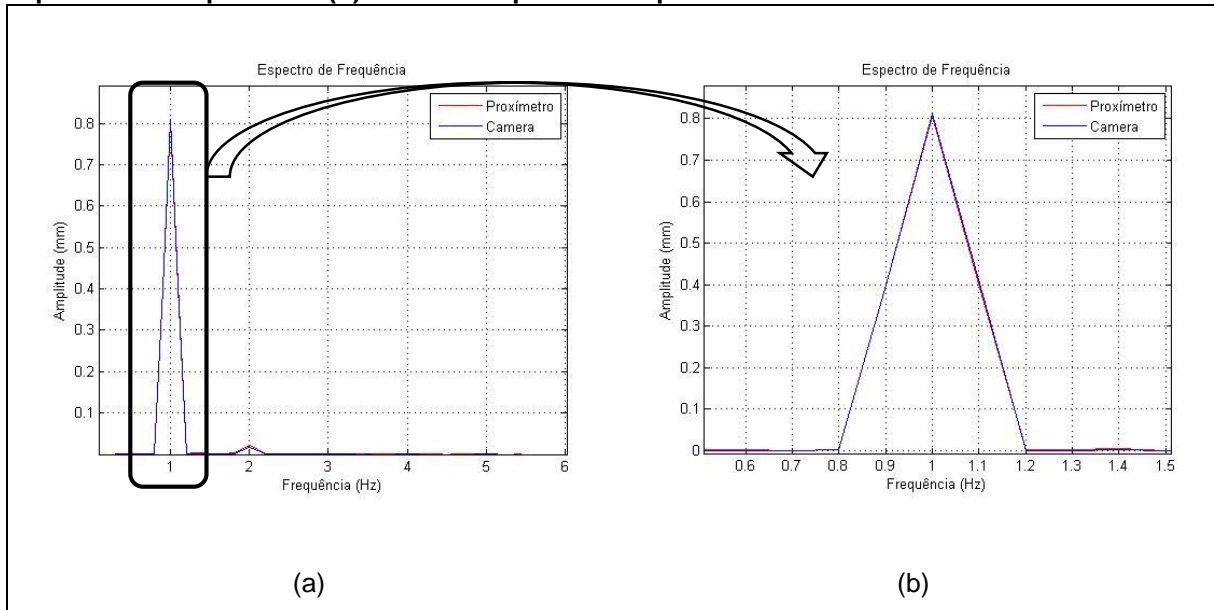
Figura 40 - Comparativo entre resultados obtidos com a câmera e proximetro. (a) Gráfico deslocamento em função do tempo. (b) Detalhe do deslocamento no intervalo de tempo entre 2 e 5s.



Fonte: Próprio Autor.

Na Figura 41 pode ser observado o gráfico do espectro de frequência resultante dos dados coletados a partir da metodologia proposta neste trabalho, bem como o método a comparação com o método adotado como referência. A Figura 41b apresenta em destaque o pico de 1Hz de frequência referente ao movimento analisado.

Figura 41 - Comparativo entre resultados obtidos com a câmera e proximetro. (a) Gráfico do espectro de frequências. (b) Detalhe do pico de frequência em 1 Hz.



Fonte: Próprio Autor.

A Tabela 4 exibe os valores de frequência e amplitude de deslocamento, resultantes dos sinais adquiridos por meio do proximetro e do processamento de imagens.

Tabela 4– Comparação entre os valores de frequência e amplitude adquiridos.

	<i>Imagens</i>	<i>Proximetro</i>	<i>Variação Percentual</i>
Frequência (Hz)	1.0420	1.0430	0.09 %
Amplitude (mm)	0.8108	0.8068	0.49 %

Como podem ser observados na Tabela 4, os valores de frequência apresentaram uma pequena variação de 0.09% entre o resultado obtido a partir da metodologia proposta e resultado oriundo da metodologia adotada como referência. A amplitude desenvolvida pelo movimento oscilatório analisado a partir do processamento de imagens atingiu o valor de 0.8108 mm, enquanto que o resultado para este mesmo parâmetro, calculado a partir dos dados provenientes dos sinais do proximetro, atingiu o resultado de 0.8068 mm, caracterizando uma variação de 0.49% entre os mesmos.

Depois de concluída a detalhada análise dos resultados obtidos com a metodologia e proposta e, posterior acareação com os adquiridos a partir do método de referência, a técnica se apresenta robusta e apta a desempenhar seu objetivo

inicial proposto. Na seção seguinte, os testes serão pautados por uma condição controlada de maior frequência e deslocamentos ainda menores, características propositalmente estabelecidas, pois, assemelham-se às encontradas em uma ampla gama de máquinas rotativas, assim como, na bancada de testes que será submetida à posterior análise.

4.1.3 Resultados para teste com frequência de 15 Hz.

Nesta seção encontram-se expostos os resultados obtidos para o experimento realizado com o Shaker eletromecânico, configurado para um deslocamento com frequência de oscilação de 15 Hz e forma de onda do sinal do tipo senoidal. A taxa de aquisição para este teste foi definida em 240 amostras por segundo, com um total de 1200 amostras coletadas, o que implica em um tempo total de aquisição de 5 segundos. Este parâmetro foi modificado devido ao valor da frequência em estudo ser da ordem de 15 Hz, o que representa a formação de 15 ciclos completos a cada segundo do movimento em estudo, coletando assim 75 ciclos ao longo de 5 segundos de aquisição.

A câmera digital teve suas configurações realizadas via menu de interface de operação ao usuário, já o sensor de proximidade teve seus parâmetros de aquisição configurados via programação por diagrama de blocos por meio do software LabView.

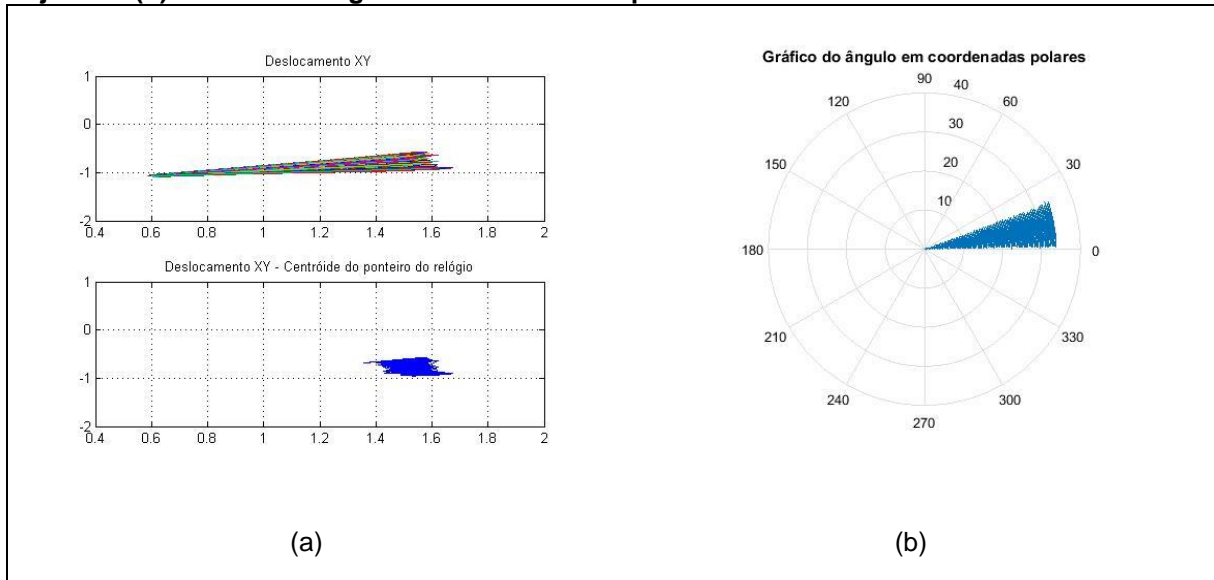
As informações, pertinentes à calibração do sistema de aquisição a partir da câmera digital, foram atualizadas de acordo com a resolução de 512x384 pixels referente à taxa de 240 quadros por segundo por meio do algoritmo computacional que realiza o processamento as imagens. Deste modo as dimensões dos pixels agora assumem o valor de 0.2180 milímetros de comprimento, 0.2907 milímetros de altura e 0.3634 milímetros na direção diagonal. O que implica, de acordo com a Eq. 8, em uma precisão do método proposto, da ordem de 0.0093 milímetros.

De forma análoga a seção anterior, o sensor de proximidade foi devidamente calibrado, e como não ocorreu qualquer alteração, tanto nas propriedades dos materiais utilizados, como no aparato experimental, o valor de sua sensibilidade não sofre qualquer alteração e tais procedimentos foram opcionalmente omitidos.

A Figura 42a exibe o reconhecimento do ponteiro do relógio comparador como um vetor no espaço, e na Figura 42b pode-se notar o gráfico do ângulo obtido por

meio das coordenadas do vetor referente ao ponteiro do relógio comparador, que representa o seu deslocamento angular durante o tempo analisado.

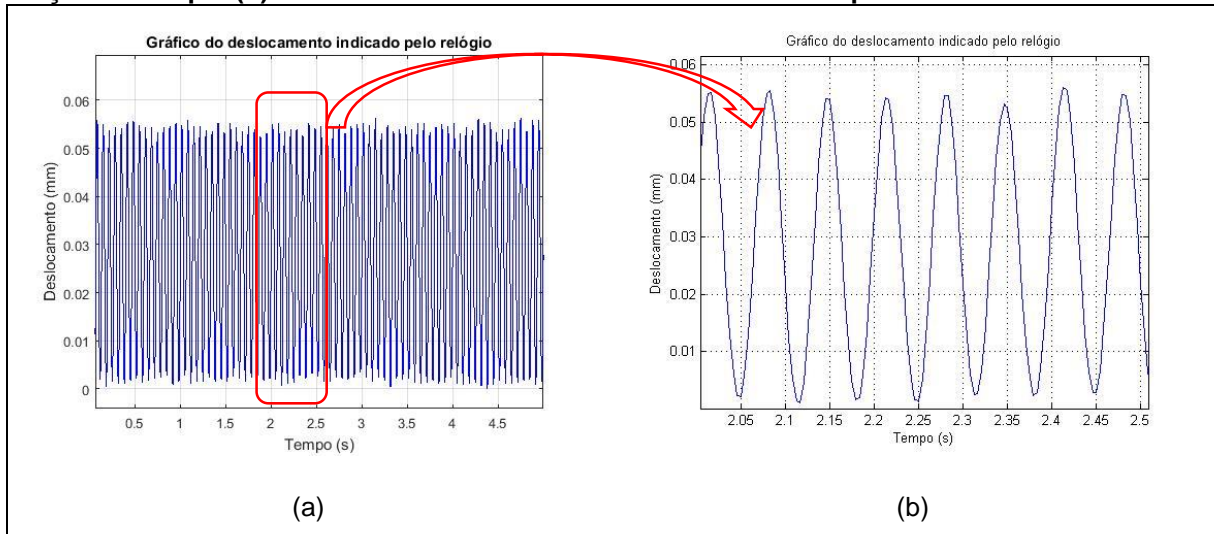
Figura 42 - Dados obtidos com o processamento das imagens. (a) Identificação do ponteiro do relógio comparador - vetores referentes à posição do ponteiro do relógio comparador e sua trajetória. (b) Gráfico do ângulo em coordenadas polares.



Fonte: Próprio Autor.

O gráfico do deslocamento em função do tempo total analisado (5 segundos), construído a partir dos dados extraídos pela presente metodologia, a partir das imagens do relógio comparador pode ser observado na Figura 43a, enquanto que a Figura 43b apresenta em destaque o deslocamento desenvolvido no intervalo de tempo entre 2 e 2.5 segundos.

Figura 43 - Dados obtidos com o processamento das imagens. (a) Gráfico deslocamento em função do tempo. (b) Detalhe do deslocamento no intervalo de tempo entre 2 e 2.5s.

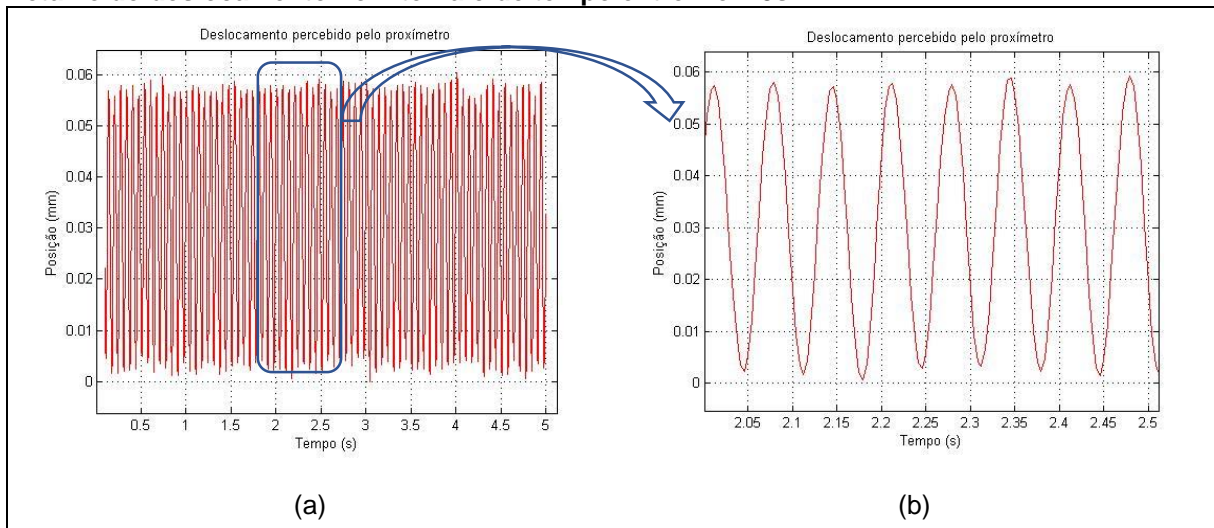


Fonte: Próprio Autor.

Como exposto previamente, o sensor de proximidade utilizado possui seu princípio de funcionamento pautado por características de um campo elétrico, sendo assim, o sinal fornecido pelo mesmo apresenta-se valores de tensão elétrica.

A partir dos dados fornecidos pelo sensor como o sinal de tensão e tempo, assim como a sensibilidade do mesmo, é possível calcular o deslocamento determinado unidades de comprimento, neste caso milímetros, em função do tempo percebido pelo proximetro. A Figura 44a apresenta o gráfico do deslocamento ao longo do tempo total de aquisição estipulado em 5 segundos. O detalhe entre o intervalo de tempo de 2 a 2.5 segundos pode ser observado na Figura 44b.

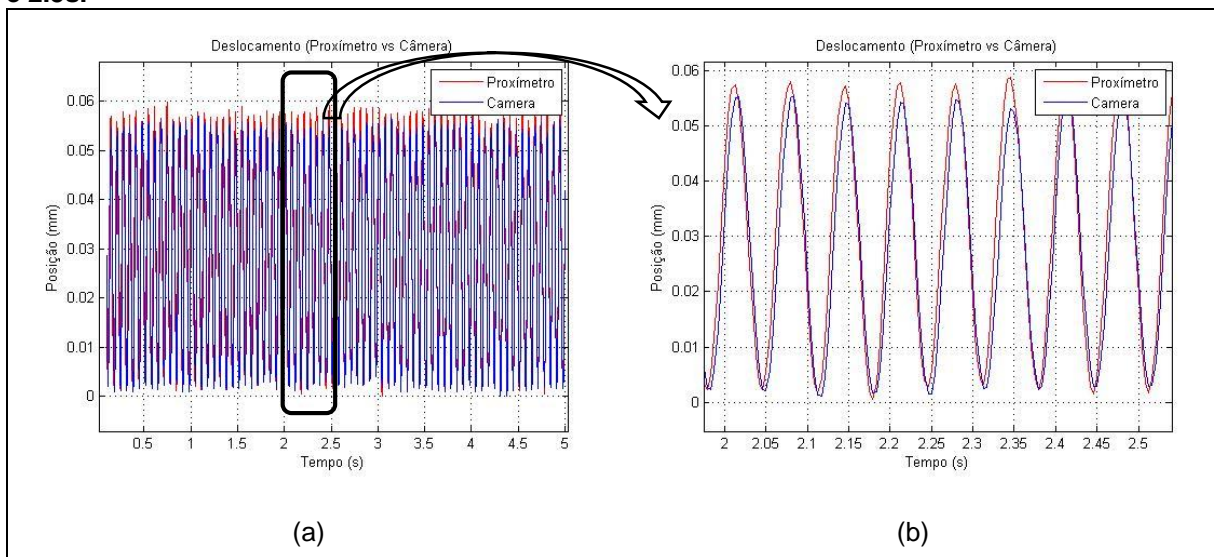
Figura 44 - Dados obtidos com proximetro. (a) Gráfico deslocamento em função do tempo. (b) Detalhe do deslocamento no intervalo de tempo entre 2 e 2.5s.



Fonte: Próprio Autor.

A Figura 45a demonstra a superposição dos gráficos do deslocamento ao longo do tempo construídos a partir dos dados extraídos por meio da metodologia proposta, em azul, e por meio do método referencial, em vermelho. Na Figura 45b observa-se o comparativo entre as duas metodologias em detalhe durante o intervalo de tempo de 2 a 2.5 segundos.

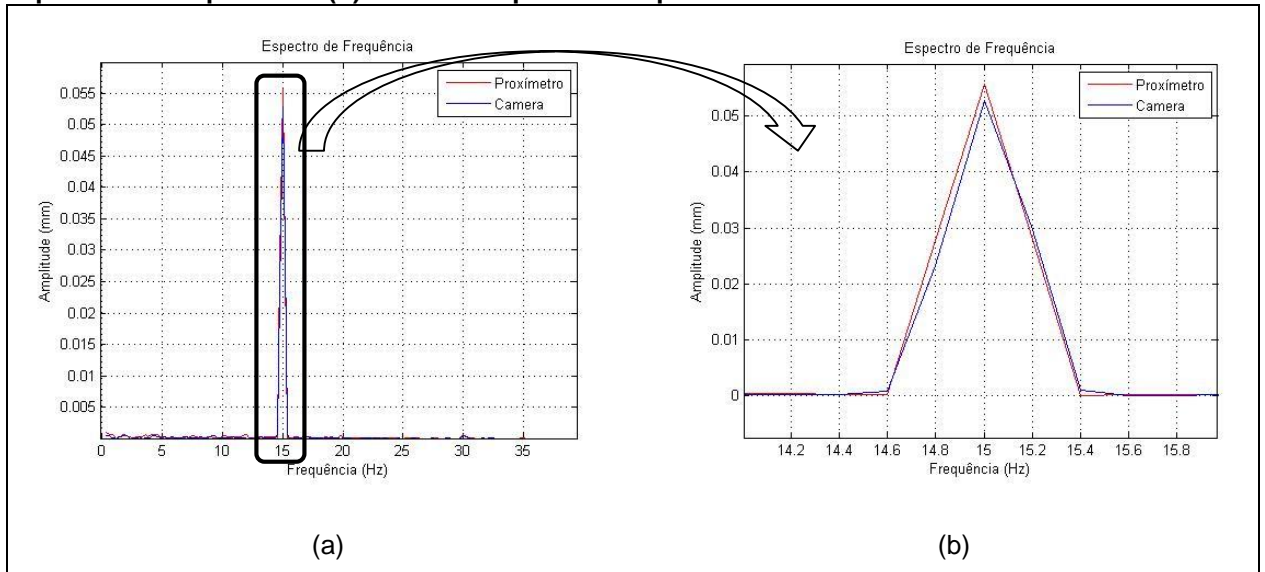
Figura 45 - Comparativo entre resultados obtidos com a câmera e proximetro. (a) Gráfico deslocamento em função do tempo. (b) Detalhe do deslocamento no intervalo de tempo entre 2 e 2.5s.



Fonte: Próprio Autor.

A Figura 46a apresenta o espectro de frequência, onde se pode notar a presença de um pico predominantemente na faixa de 15 Hz, com amplitude entre 0.050 e 0.060 mm. No detalhe Figura 46b é possível visualizar a região ao redor do pico de frequência e evidenciar a comparação entre os resultados obtidos a partir de duas abordagens metodológicas diferentes, onde o gráfico de linha azul representa o resultado proveniente do processamento de imagens capturadas pela câmera e o de linha vermelha o resultado oriundo do proximetro.

Figura 46 - Comparativo entre resultados obtidos com a câmera e proximetro. (a) Gráfico do espectro de frequências. (b) Detalhe do pico de frequência em 15 Hz.



Fonte: Próprio Autor.

A Tabela 5 relaciona os resultados de frequência e amplitude do movimento analisado sob duas diferentes formas de aquisição e processamentos de sinais. Nota-se que, para a determinação do valor de frequência do movimento a variação entre os dois métodos foi de 0.07% e que a variação na amplitude da oscilação atingiu a ordem de 5.04%.

Tabela 5– Comparação entre os valores de frequência e amplitude adquiridos.

	<i>Imagens</i>	<i>Proximetro</i>	<i>Variação Percentual</i>
Frequência (Hz)	15.020	15.030	0.07 %
Amplitude (mm)	0.0528	0.0556	5.04 %

O resultado para o valor de amplitude, do movimento capturado por meio da metodologia proposta, evidencia o fato de que, caso fosse realizada a medição diretamente na estrutura sem a utilização do relógio comparador, não seria possível identificar um deslocamento desta magnitude. Pois como a dimensão da diagonal do pixel é da ordem de 0.3634 mm, apenas deslocamentos superiores a 0.7268 mm seriam identificados caso a medição ocorresse de forma direta sobre a superfície da estrutura. O que enfatiza a grande contribuição que a utilização do relógio comparador acoplado à estrutura agrega a presente metodologia.

Nos testes previamente realizados, a metodologia em estudo foi exposta a sinais de vibração controlada, gerada a partir de um *Shaker* eletromecânico, a fim de

analisar seu comportamento e eficácia perante condições específicas de baixas frequências (menores que 15 Hz) e amplitudes (menores que 1 mm). A proposta deste estudo baseia-se em estender a aplicação do método desenvolvido a condições de vibrações oriundas de equipamentos comumente utilizados em diversas plantas industriais. Assim, na seção seguinte foi realizada uma análise dos índices de vibração, de um equipamento mais complexo, formado por um motor, redutor e rotor. Os sinais de vibração foram coletados por meio da metodologia proposta e também por da metodologia que utiliza sensor convencional, utilizada como referência, de forma análoga a seção anterior. Os dados foram analisados e confrontados entre si, para avaliação do desempenho da presente técnica perante sinais capturados de uma máquina rotativa em operação.

4.2 Experimento 2 - Aquisição dos sinais da caixa de transmissão redutora de velocidades.

O presente experimento consiste na aquisição e análise de sinais de vibração de uma caixa de transmissão redutora de velocidades, composta de engrenagens cilíndricas helicoidais. O redutor utilizado foi o modelo HS1/17 do fabricante Cestari com relação de transmissão de 1:7, potência e velocidade nominal máxima de operação de 3 cv (cavalo-vapor) e 1750 rpm (rotações por minuto), respectivamente. O sistema de engrenagens do respectivo redutor foi submetido à rotação proveniente de um motor elétrico trifásico, modelo 80 da fabricante Kohlbach S.A. com potência nominal de 1.5 cv, 3445 rpm, tensão de 220 volts, corrente elétrica de operação de 4.8 A (amperes) e frequência de 60 Hz. O referido motor teve seu eixo rotativo acoplado ao eixo de entrada da caixa de transmissão de velocidades por meio de um acoplamento flexível do tipo aranha, conforme mostrado na Figura 47.

Um equipamento do tipo inversor de frequência foi utilizado para efetuar o acionamento do motor em rotações variáveis, as quais podem ser determinadas pelo usuário. O inversor de frequência utilizado para controlar a rotação do motor foi o modelo CFW 08 da fabricante Weg equipado com o software versão 4.1X08995241 P/9.

A Tabela 6 relaciona todos os equipamentos utilizados no presente experimento, assim como suas especificações.

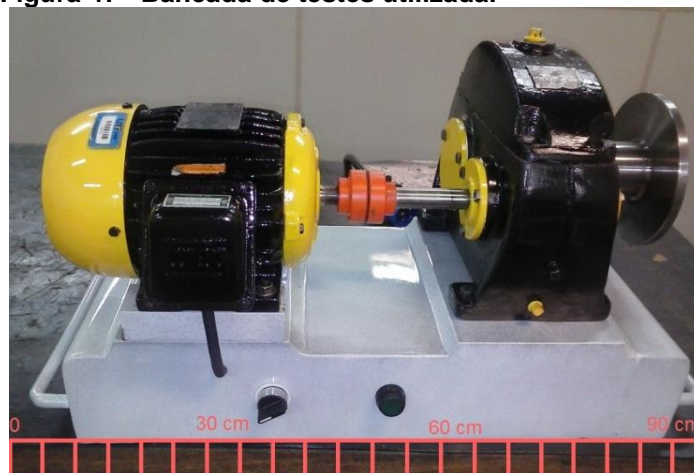
Tabela 6– Equipamentos utilizados nos testes com Redutor.

Itens	Especificações
Motor elétrico	Modelo N°80. Fabricante: Kohlbach S.A. Rotação nominal: 3445. Potencia Nominal: 1.5 cv. Alimentação elétrica: 220V, 4.8A, 60Hz.
Inversor de Frequência	Modelo CFW-80. Fabricante: Weg. Versão do software: 4.1X08995241 P/9.
Caixa de transmissão redutora de velocidades	Modelo HS1/17. Fabricante: Cestari.

	Relação de transmissão: 1:7. Potência máxima de operação: 3cv. Velocidade máxima: 1750rpm.
Relógio Comparador	Modelo: 2046S. Fabricante: Mitutoyo.
Base Magnética	Modelo: 7032B. Fabricante: Mitutoyo.
Sensor de proximidade	Modelo: 98052. Tipo: Indutivo. Fabricante: Vibrocontrol.
Câmera Digital	Modelo: EXILIM EX-ZR700. Resolução*: Conforme Tabela 2. Fabricante: CASIO.
Sistema de aquisição	Modelo: cDaq-9172. Fabricante: National Instruments.
Condicionador de sinais	Modelo: GS5001. Fabricante: Vibrocontrol.
Fonte eletrônica	Modelo: PS-6000. Fabricante: Icel.
Microcomputador	Intel I5 – 4gb Memória Ram.

O conjunto motor elétrico, redutor e rotor foram dispostos conforme exhibe a Figura 47.

Figura 47– Bancada de testes utilizada.



Fonte: Próprio Autor:

4.2.1 Calibração do sensor de proximidade com o Redutor de Velocidade.

De acordo com os conceitos previamente explicitados acerca dos princípios de funcionamento do sensor de proximidade, na seção 3.3, para cada nova coleta de dados perante a um diferente tipo de material metálico faz-se necessário a calibração do sensor. Como o objeto de estudo (caixa de transmissão) é constituído do material do tipo ferro fundido, uma nova calibração foi realizada para a determinação da sensibilidade do sensor de proximidade face ao material constituinte da carcaça do redutor.

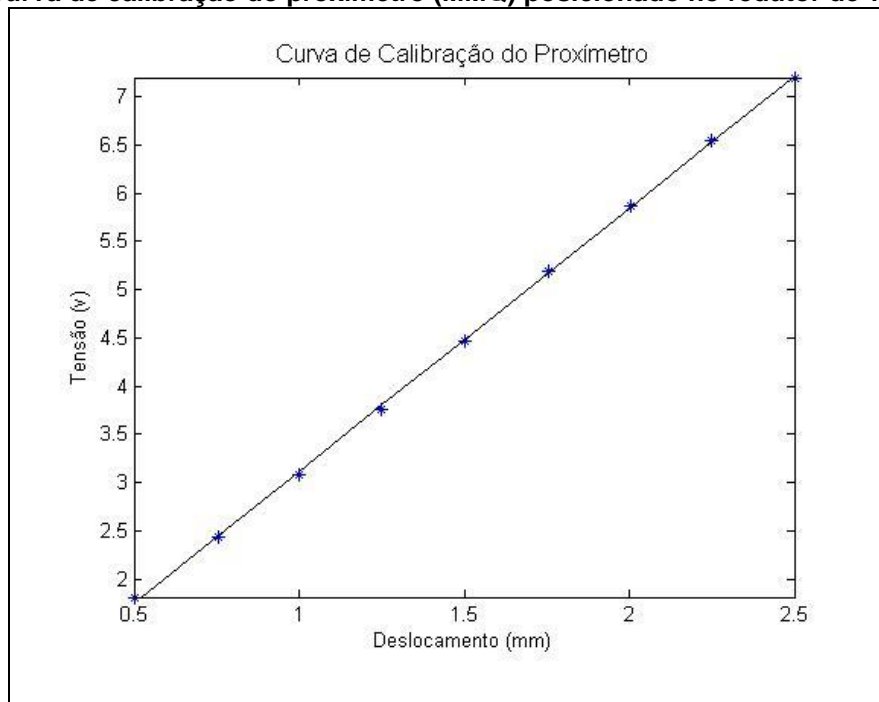
O procedimento adotado para a realização da nova calibração foi análogo ao desenvolvido no item 4.1.1 para os testes realizados com o *shaker*, e seus resultados são apresentados sucintamente a seguir. Os dados coletados durante o processo de calibração podem ser apreciados na Tabela 7.

Tabela 7– Dados provenientes da Calibração do Proxímetro.

Incrementos (mm)	Tensão (V)
0.500	-1.816
0.755	-2.441
1.000	-3.079
1.250	-3.762
1.500	-4.466
1.755	-5.183
2.005	-5.867
2.250	-6.549
2.500	-7.196

Construído a partir dos dados da Tabela 7, o gráfico que representa a distribuição dos pontos experimentais pode ser observado na Figura 48. Como era esperado, se aproxima de reta linear. Assim, o valor da sensibilidade foi aproximado a coeficiente angular de uma reta, que foi determinada pelo método de mínimos quadrados, e atingiu a ordem de 2.723 V/mm, cujo desvio padrão dos pontos em relação a curva foi de 0.0335.

Figura 48– Curva de calibração do proxímeter (MMQ) posicionado no redutor de velocidades.



Fonte: Próprio Autor.

Conforme nota-se no gráfico da Figura 48, entre o intervalo de 0.5mm a 2.5mm a resposta em tensão do sensor tem caráter linear, isto define o chamado 'gap' do sensor, o que significa que o ajuste da distância, entre a face do sensor e a estrutura, deve obedecer aos limites deste intervalo. Este processo possibilita a correta instalação do sensor e a garantia de uma boa leitura e resposta do mesmo.

4.2.2 Definição do ponto de medição e configuração dos equipamentos

A determinação da localização do ponto de medição dos índices de vibração da caixa de transmissão redutora de velocidades foi regida de acordo com a norma ISO 10816-3. A aquisição dos sinais foi realizada no equipamento redutor de velocidades, que no presente trabalho optou-se pela inserção de uma avaria na máquina rotativa, na forma de uma massa de desbalanceamento, que foi fixada no rotor. A massa adicionada foi de 818.47 gramas, na extremidade do rotor em balanço, conforme mostrado na Figura 49.

Figura 49 - Detalhe da massa de desbalanceamento.

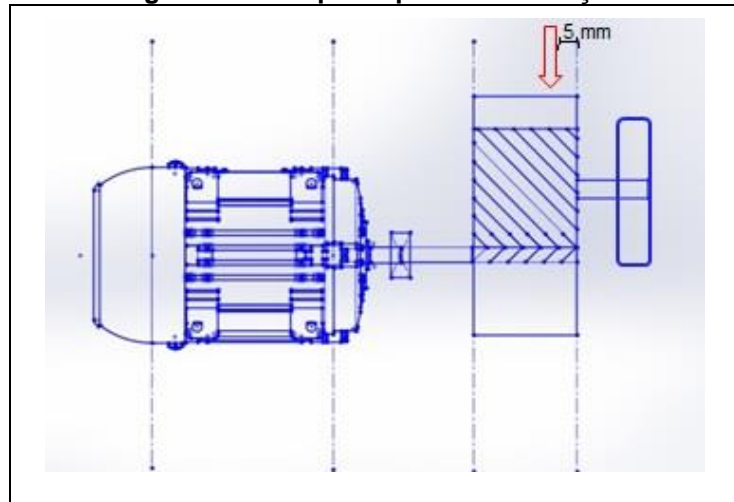


Fonte: Próprio Autor.

Dentre as mais diversas avarias presentes em máquinas rotativas, optou-se por implementar um desbalanceamento, devido sua ampla ocorrência em parques industriais e a facilidade de controle de suas variáveis para rotores rígidos, como o apresentado no presente experimento, dado que, o desbalanceamento é provocado pela força centrípeta ou radial, sendo assim sua amplitude proporcional a massa, sua distância ao centro de giro, e ao quadrado da rotação, conforme Equação 10.

O ponto definido para a coleta dos sinais de vibração está posicionado no redutor de velocidades, devido a sua proximidade da principal fonte causadora de vibração, e estar posicionado no rolamento do redutor, que se encontra alojado na própria carcaça do redutor. Na Figura 50 pode ser visualizado, com o auxílio de uma seta de coloração vermelha no croqui, o ponto de medição escolhido.

Figura 50 - Croqui do ponto de medição.



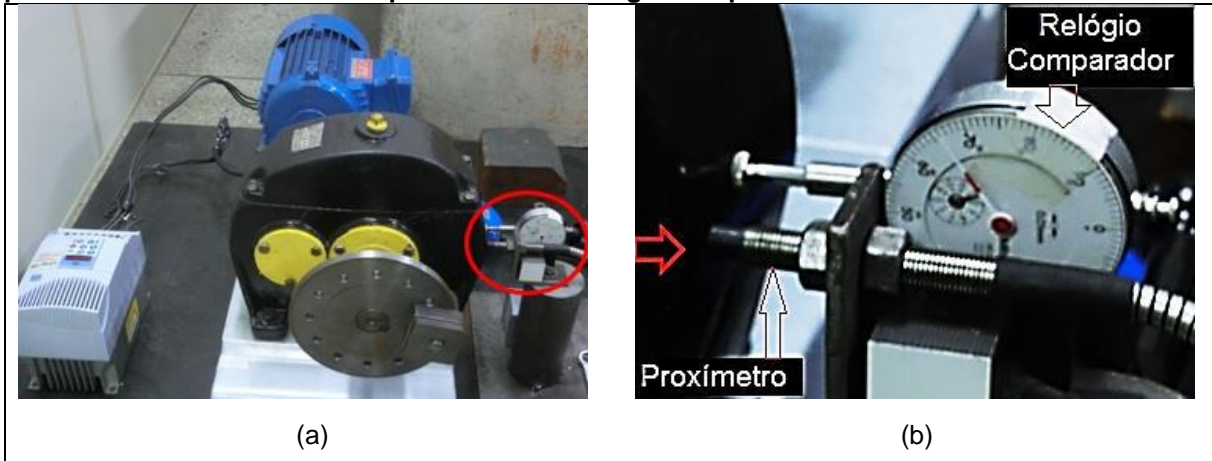
Fonte: Próprio Autor.

Os demais pontos de medição existentes na máquina rotativa analisada foram descartados devido ao fato de encontrar-se, previamente estabelecido o tipo de anomalia presente na máquina. Logo, todos os esforços foram direcionados para a região próxima do eixo, onde se encontra acoplado o rotor, que possui a massa de desbalanceamento. Já que, o intuito deste trabalho inicial, está voltado para a detecção dos índices de vibração existentes no equipamento e não na caracterização quanto a tipo e origem de anomalia existente, estudo este que poderá vir a ser explorado em trabalhos futuros a este.

A frequência fornecida pelo inversor ao motor elétrico foi ajustada para 25 Hz, assim, o motor teve sua velocidade de rotação determinada em 1435 rpm ou 24.40 Hz. Esta diferença entre os valores de frequência se deve ao fato de que o valor de frequência que é ajustado a partir do inversor controla a frequência de corrente elétrica que é fornecida ao mesmo, ou seja, como o motor elétrico utilizado possui frequência de rotação de 3445 rpm, a uma frequência da rede elétrica de 60 Hz, todo e qualquer valor abaixo de 60 Hz determinará uma rotação proporcional a esta faixa de operação. Nota-se que, o eixo de rotação está acoplado diretamente ao eixo de entrada da caixa redutora de transmissão de velocidades. Deste modo, o redutor de velocidades que possui relação de transmissão 1:7, recebe a rotação de 24,40 Hz em seu eixo de entrada e fornece a rotação de 3,48 Hz em seu eixo de saída. Deste modo, a velocidade do rotor acoplado ao eixo de saída da caixa de transmissão desempenha a velocidade de 3,48 Hz.

A Figura 51a ilustra o arranjo experimental e destaca o posicionamento dos equipamentos na caixa redutora de velocidades. O relógio comparador e o proxímetro foram posicionados no ponto de medição pré-definido de acordo com o detalhe da Figura 51b.

Figura 51– Arranjo experimental. (a) Equipamentos da bancada rotativa. (b) Detalhe do posicionamento do sensor de proximidade e relógio comparador.



Fonte: Próprio Autor.

O relógio comparador teve seu posicionamento auxiliado por uma base magnética universal e a extremidade da sua haste foi fixada à carcaça do redutor com o auxílio de uma cola de contato. Já o sensor de proximidade foi fixado em um suporte de material metálico devidamente construído para este fim, na Figura 52, pode-se notar o relógio comparador acoplado a base magnética, assim como o dispositivo fabricado para a fixação do proxímetro.

Figura 52– Dispositivos de fixação do relógio comparador e do proxímetro.

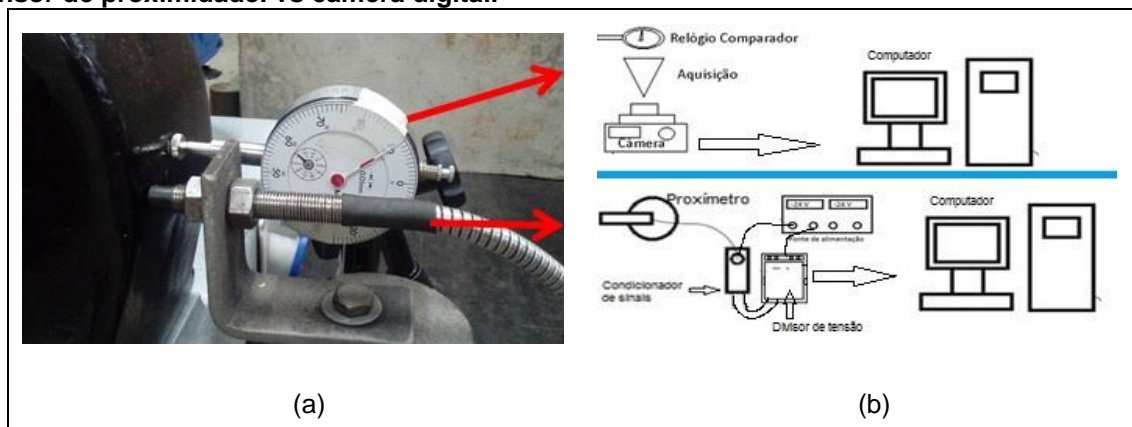


Fonte: Próprio Autor.

Para a realização da aquisição dos sinais do sensor de proximidade o mesmo foi conectado, via cabo coaxial BNC com proteção antirruído, a um condicionador de sinais alimentado por uma tensão de -24 volts fornecida a partir de uma fonte elétrica. O sinal de resposta, fornecido pelo condicionador em forma de tensão elétrica na faixa de -4 a -24 volts, recebe o mesmo tratamento descrito no item 4.1 por meio do circuito divisor de tensão e por fim é enviado à placa de aquisição da National Instruments. A placa de aquisição comunica-se via cabo usb com um micro computador, onde por meio do software Labview pode-se realizar os ajustes pertinentes à análise em tempo real dos sinais e seu arquivamento.

Os dados do deslocamento angular do ponteiro do relógio comparador, adquiridos por meio da câmera digital são armazenados em um dispositivo portátil e regravável de armazenamento de dados com memória flash, e posteriormente transferidos para um microcomputador. Estes dados são posteriormente processados utilizando a presente metodologia, e por fim arquivados. As Figuras 53a,b ilustram a configuração adotada para a realização deste procedimento.

Figura 53– Configurações para a aquisição dos sinais. (b) Esquema de aquisição utilizando o sensor de proximidade. vs câmera digital.



Fonte: Próprio Autor.

Por meio do auxílio do software LabView, a placa de aquisição conectada ao sensor de proximidade foi configurada para realizar a coleta dos dados a uma taxa de 240 amostras por segundo, durante um intervalo de tempo de 5 segundos, resultando em um total de 1200 amostras coletadas.

Os dados extraídos a partir do processamento de imagens foram adquiridos exatamente à mesma taxa de amostragem e quantidade total de amostras. Através

da interface da câmera digital utilizada, a mesma foi configurada para uma taxa de captura de 240 quadros por segundo, cada quadro com a resolução de 512x384 pixels durante o intervalo de tempo de 5 segundos, totalizando 1200 amostras de maneira análoga ao procedimento adotado para o sensor de proximidade.

A partir dos conceitos e das relações apresentadas nas seções 3.2.5 e 3.2.6, as informações referentes à calibração dos parâmetros do processamento das imagens foram calculadas e cada pixel apresentou dimensões de 0.2027 milímetros na direção vertical. 0.1521 milímetros na direção horizontal e 0.2534 milímetros na diagonal e a precisão foi estimada 0.0065 milímetros a partir da Equação 8, apresentada na seção 3.2.6.

Ambos os dados obtidos foram processados posteriormente em ambiente Matlab, cada um com o nível de tratamento imposto devido à forma de abordagem. Assim, para os sinais resultantes do proximetro, estes recebem um tratamento relativamente mais simples, que consiste em utilizar a sensibilidade calculada em unidades de volts/milímetros, para converter o sinal de tensão em posições determinadas pela escala métrica em milímetros.

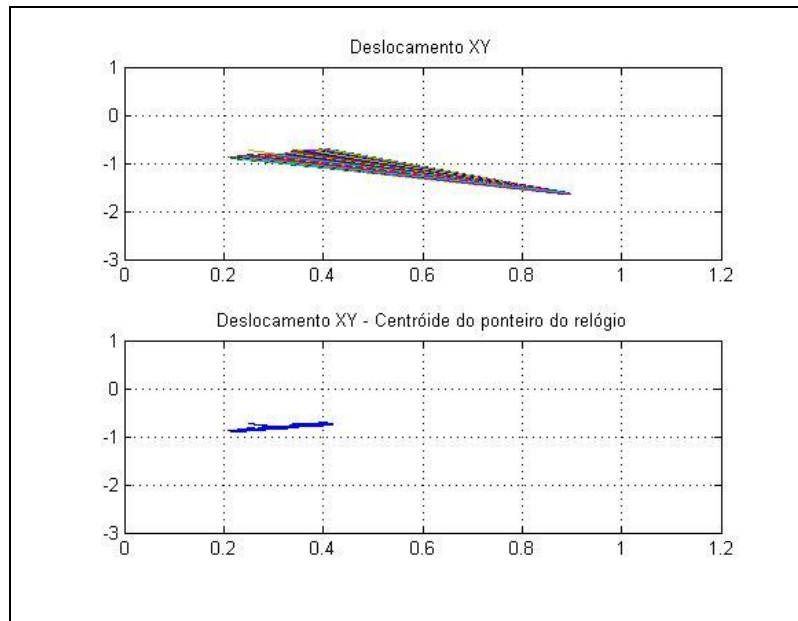
As imagens coletadas por meio da câmera digital são submetidas a processamento computacional relativamente mais complexo, baseado nos conceitos descritos e detalhados no início do item 4.

4.2.3 Avaliação dos resultados experimentais

Nesta seção encontram-se relacionados, em um primeiro momento os resultados obtidos por meio da metodologia proposta e, em um segundo momento os resultados provenientes da aplicação do método adotado como padrão de referência. Por fim é apresentada uma análise comparativa entre as duas metodologias.

A Figura 54 demonstra a identificação do ponteiro do relógio comparador como vetores no espaço bidimensional XY, assim como a trajetória de seu deslocamento.

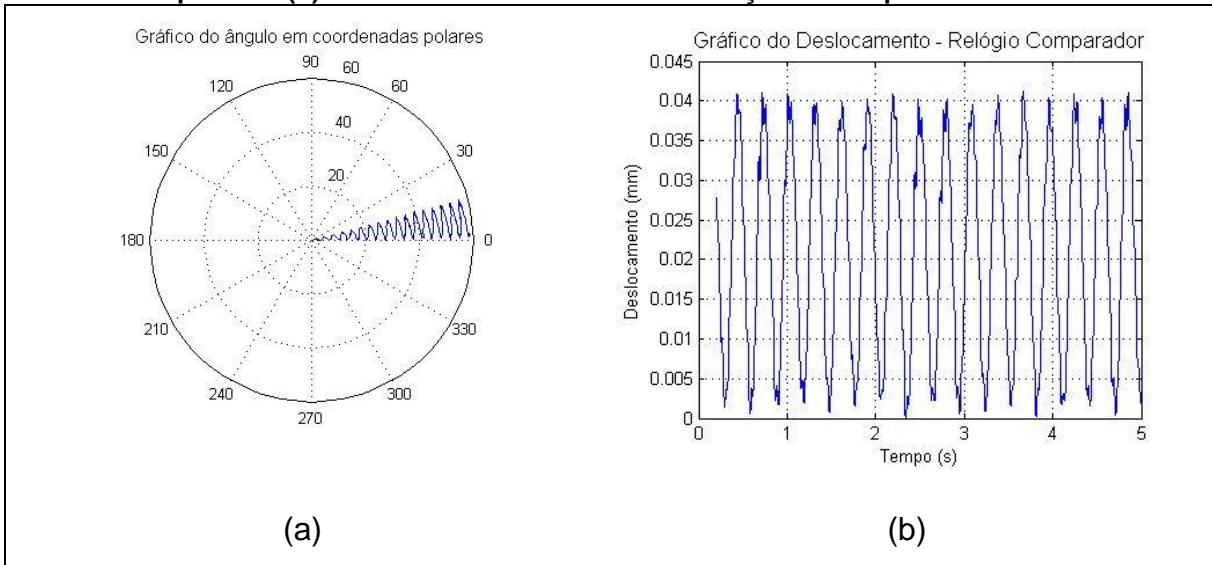
Figura 54 - Identificação do ponteiro do relógio comparador - vetores referentes à sua posição e sua trajetória.



Fonte: Próprio Autor.

As posições que o ponteiro do relógio assume ao longo do tempo foram reconstruídas como vetores e, o deslocamento angular destes foi registrado de acordo com o ângulo obtido através das coordenadas polares que os definem analiticamente no espaço (Figura 55a). Os dados para o ângulo, que os vetores assumem no decorrer do tempo, são estipulados inicialmente na unidade de medida denominada radianos e posteriormente transformados para a escala em graus. De posse deste ângulo e do fator de escala do relógio comparador, estipulado pelo fabricante como 360 graus para cada 1 milímetro de deslocamento ($360^\circ : 1\text{mm}$), pode-se calcular o deslocamento total no decorrer do tempo (Figura 55b).

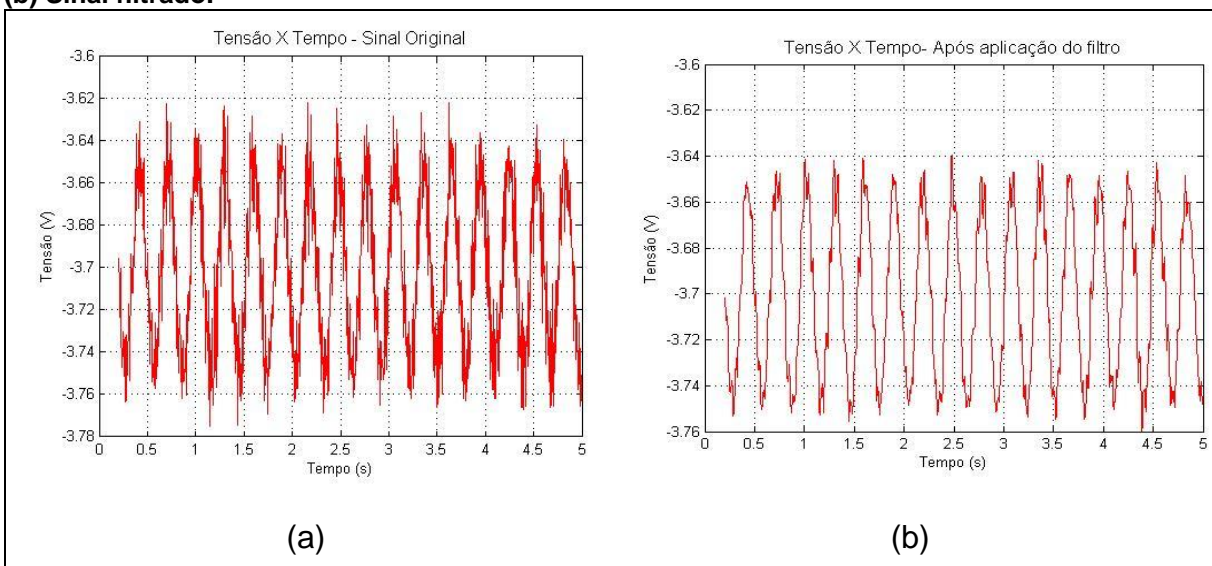
Figura 55 - Dados obtidos com o processamento das imagens. (a) Gráfico do Ângulo em coordenadas polares. (b) Gráfico do deslocamento em função do tempo.



Fonte: Próprio Autor.

Na Figura 56 notam-se os valores da tensão percebida pelo sensor em função do tempo, obtidos por meio do sensor de proximidade. A Figura 56a exibe o sinal original adquirido, ao passo que a Figura 56b demonstra o sinal após a aplicação de um filtro tipo passa baixa com frequência de corte configurada para 45 Hz. Este procedimento foi aplicado devido ao acometimento de ruídos na região entre 50 e 60 Hz no sinal capturado com o sensor de proximidade.

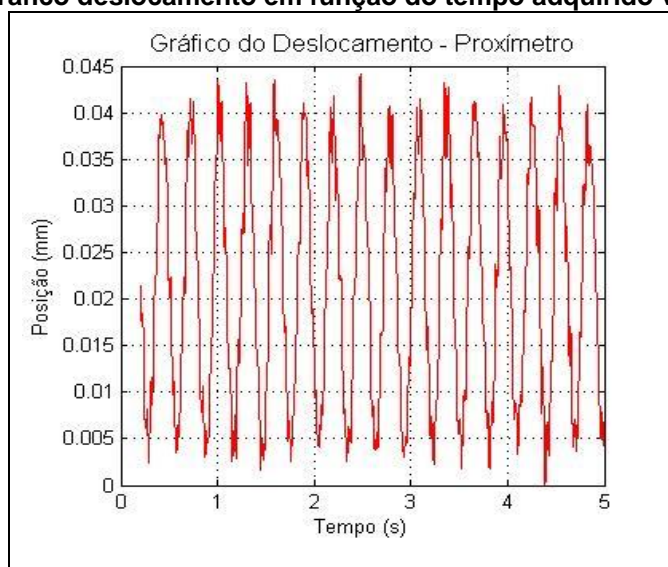
Figura 56– Gráfico da tensão em função do tempo obtida com o proximetro. (a) Sinal original. (b) Sinal filtrado.



Fonte: Próprio Autor.

Os valores de deslocamento total foram obtidos a partir do sinal da variação de tensão fornecida pelo sensor e sua respectiva sensibilidade, calculada a partir do processo prévio de calibração do mesmo. A Figura 57 mostra o gráfico do deslocamento em função do tempo identificado por meio do sensor de proximidade.

Figura 57 - Gráfico deslocamento em função do tempo adquirido via proximímetro.



Fonte: Próprio Autor.

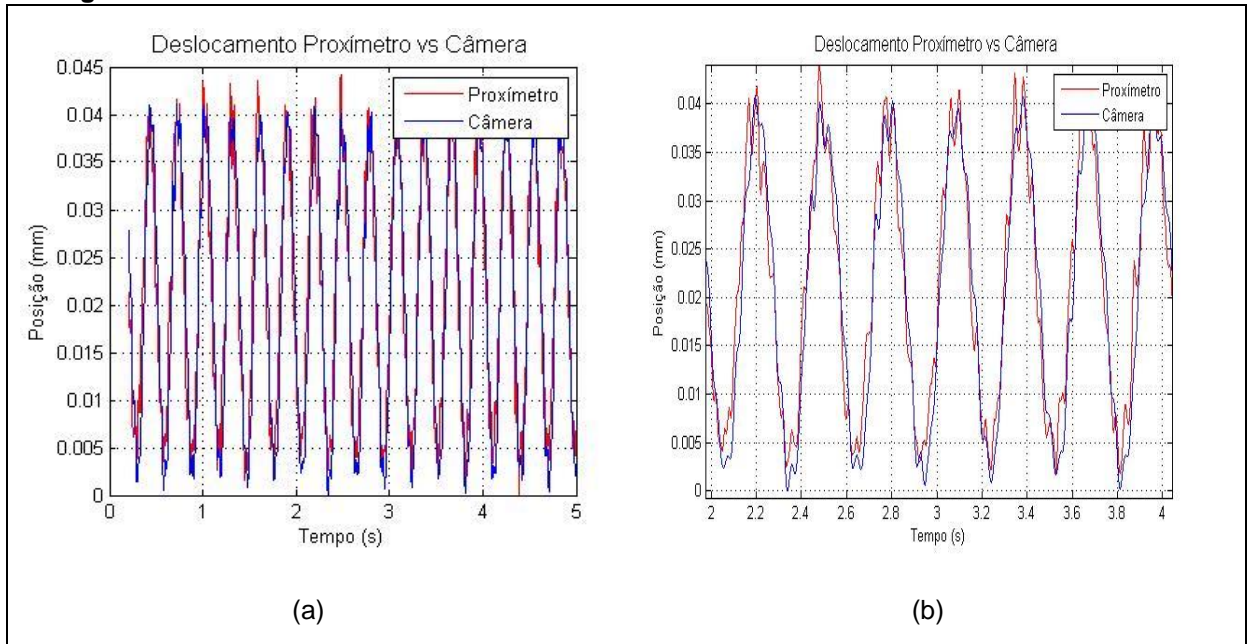
A Figura 58 demonstra a superposição dos gráficos do deslocamento identificado sob os dois métodos expostos no presente trabalho, que permite realizar uma análise comparativa entre o resultado obtido a partir da metodologia abordada e a referência adotada.

O sinal representado pela coloração vermelha expõe o resultado obtido por meio da aquisição com sensor de proximidade tradicional (Proximímetro), enquanto o sinal obtido por meio do processamento das imagens do relógio comparador capturadas pela câmera está representado pelas linhas de coloração azul.

A Figura 58a mostra os deslocamentos resultantes das duas metodologias ao longo do tempo total de aquisição, padronizado em 5 segundos para ambas.

Vale ressaltar que, durante o processamento de dados, em se tratando de procedimentos relacionados à discretização, aplicação de filtros, janelamento, entre outros, todos os dados receberam rigorosamente o mesmo tratamento sob as mesmas condições, seja para os adquiridos por meio da metodologia proposta, seja para os provenientes do método definido como referência.

Figura 58 - Comparativo entre resultados obtidos com a câmera e proximetro. (a) Gráfico deslocamento em função do tempo. (b) Detalhe do deslocamento no intervalo de tempo entre 2 e 4 segundos.



Fonte: Próprio Autor.

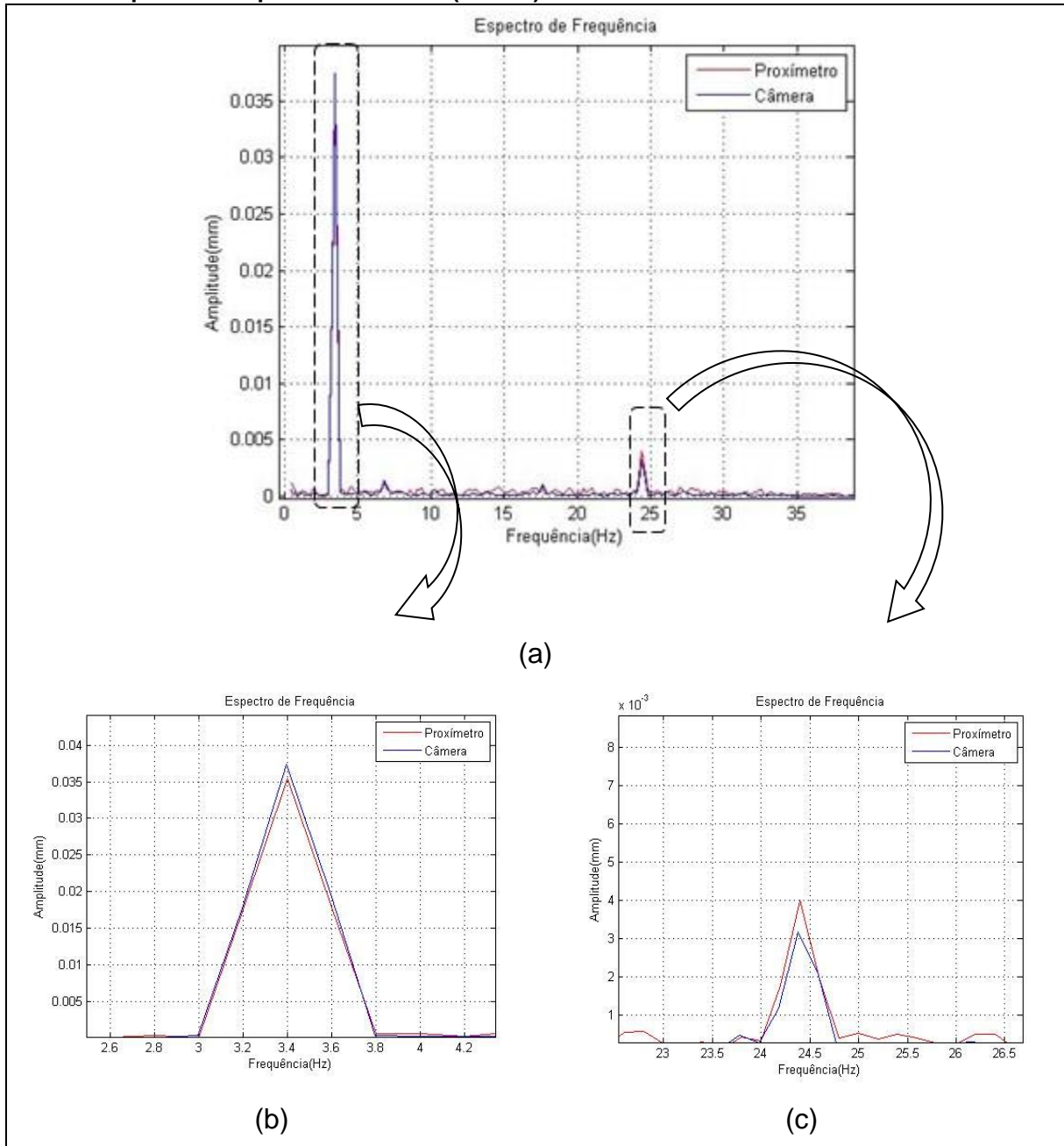
No detalhe da Figura 58b nota-se o deslocamento no intervalo de tempo entre 2 e 4 segundos, onde pode-se visualizar a forma de onda, assim como, a correspondência entre as linhas construídas a partir dos diferentes métodos.

Na Figura 59 pode ser observado o gráfico do espectro de frequência também apresentado de forma comparativa entre os dois métodos de coleta dos sinais, onde se pode visualizar a presença nítida de dois picos predominantes.

Os gráficos do espectro de frequências da Figura 59, demonstram um bom nível de correspondência entre os resultados obtidos a partir dos dois diferentes métodos de aquisição de sinais implementados.

A Figura 59b apresenta em destaque o pico de frequência ao redor da região de 3.4 Hz, referente a rotação desempenhada pelo rotor localizado no eixo de saída da caixa de transmissão. Enquanto que, a Figura 59c demonstra em detalhe a região do pico de frequência localizado em 24.40 Hz, referente à velocidade de rotação desenvolvida pelo motor elétrico.

Figura 59 - Comparativo entre resultados obtidos com a câmera e proximetro. (a) Gráfico do espectro de frequências. (b) Detalhe do pico de frequência de rotação do rotor (3.4Hz). (c) Detalhe do pico de frequência do motor (24.4Hz).



Fonte: Próprio Autor.

A análise do espectro de frequências da Figura 59a proporciona a constatação de pequena discrepância entre as amplitudes dos dois picos predominantes no mesmo. Este fato pode ser elucidado devido às circunstâncias referentes à fonte de vibração predominante estar posicionada no rotor, devida à presença de massa adicional.

A Tabela 8 relaciona os valores de amplitude e frequência, calculados a partir dos dados adquiridos sob as duas diferentes técnicas, uma que utiliza o processamento de imagens e a outra que utiliza diretamente o sensor de proximidade, também chamado de proximímetro. Na mesma tabela pode-se notar também a diferença, na forma de variação percentual, entre os dois resultados.

Tabela 8 - Comparação entre os valores de frequência e amplitude obtidos

<i>Pico de Frequência (Hz)</i>			<i>Amplitude [pico-pico] (mm)</i>		
<i>Imagens</i>	<i>Proximímetro</i>	<i>Variação Percentual</i>	<i>Imagens</i>	<i>Proximímetro</i>	<i>Variação Percentual</i>
3.397	3.400	0.09 %	0.0374	0.0355	5.08%
24.380	24.400	0.08 %	0.0032	0.0040	20.00 %

De acordo com a Tabela 8, a variação entre os resultados referentes ao pico de frequência, relacionado à velocidade de rotação do rotor, atingiu a ordem de 0.09% quando confrontados os dois métodos aplicados. Enquanto que, o pico de frequência referente à rotação do motor, calculado a partir do processamento de imagens, apresentou uma variação de 0.08% e relação ao obtido a partir do processamento dos dados capturados por meio do proximímetro.

O resultado para o cálculo da amplitude do deslocamento relacionado à frequência de rotação do rotor (3.40 Hz) via processamento de imagens assume o valor de 0.0374 milímetros, ante ao resultado de, 0.0355 milímetros mediante o uso do sensor de proximidade, o que revela uma variação percentual de 5.08 %. A variação entre as amplitudes, referentes à frequência de rotação do motor (24.4Hz), foi da ordem de 20%. Tal variação deve-se principalmente a baixa magnitude do valor da amplitude de deslocamento na faixa de rotação do motor e conseqüentemente à discretização da frequência no tempo.

A análise dos resultados obtidos para os valores de amplitude do deslocamento evidencia a importância da utilização do relógio comparador, pois o deslocamento da ordem de 0.0374 milímetros não seria identificado a partir do processamento de imagens com a respectiva resolução utilizada, quando medido diretamente na estrutura pela câmera digital. Uma vez que, a dimensão de cada pixel apresenta o valor de 0.2534 milímetros na direção diagonal, e o deslocamento mínimo percebido

seria da ordem de duas vezes este valor, ou seja, 0.5068 milímetros. Enfatizando assim, que a aplicação do relógio comparador à metodologia possibilita a detecção de pequenos deslocamentos.

De acordo com os conceitos apresentados no item 3.4.2, o critério adotado para a análise dos resultados obtidos a partir da aquisição dos níveis de vibração encontra-se estipulado por meio da normativa ISO 10816-3.

A referida norma aplica-se ao equipamento rotativo em estudo, pois, trata da avaliação de severidade em máquinas industriais com potência de até 15 KW e velocidades nominais entre 120 e 15000 rpm, ou entre 2 e 250 Hz, através da medição em partes não rotativas, em pontos definidos em função da localização de seus mancais.

A Figura 60 mostra uma tabela de classificação apresentada na referida norma, onde se pode notar os limites definidos para os valores de deslocamento e velocidade, que definem a condição da máquina rotativa entre os níveis A, B, C e D.

Figura 60- Critério de severidade dos índices de vibração.

Sub-grupo do equipamento	Zona de avaliação	Deslocamento (RMS)	Velocidade (RMS)
		[μm]	[mm/s]
Rígido	A		
	B	11	1.4
	C	22	2.8
	D	36	4.5
Elástico	A		
	B	18	2.3
	C	36	4.5
	D	56	7.1

Fonte: ISO 10816-3.

A Tabela 9 relaciona os valores de deslocamento (RMS) em micrometros (μm) resultantes do processamento dos dados obtidos por meio do processamento de imagens e o a partir do sensor de proximidade, assim como a respectiva classe de avaliação de acordo com a norma vigente.

Tabela 9 - Comparação entre os valores de deslocamento (RMS/0-pico).

	<i>Imagens</i>	<i>Proxímetro</i>
Deslocamento (μm)	13	14
<i>Zona de avaliação (ISO10816-3)</i>	B	B

Conforme demonstrado na Tabela 9, a máquina rotativa analisada apresenta índices de vibração que a caracterizam na zona de classificação de severidade do tipo B. Esta atribuição representa que o equipamento encontra-se em situação aceitável para operação continuada. Normalmente encontrada em máquinas com manutenção eficiente e operada adequadamente. Embora exista a presença de um desbalanceamento no rotor da mesma, devida à sua baixa velocidade de rotação o equipamento é seguro para operar na referida faixa de rotação.

A presente técnica se mostrou satisfatória na identificação destes parâmetros, dados que seus resultados foram equivalentes aos obtidos com técnicas consagradas de aquisição e monitoramento de integridade de máquina e equipamentos industriais. Evidenciando a efetividade e viabilidade da utilização da mesma para este fim e possibilitando a exploração da metodologia desenvolvida para uma ampla faixa de aplicação em trabalhos futuros.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente trabalho apresenta uma técnica de medida de deslocamento de baixa amplitude e frequência, a partir do processamento de imagens capturadas através de uma câmera digital. Assim, testes experimentais foram realizados a fim de detectar, analisar e mensurar pequenos deslocamentos por meio da metodologia proposta. Estes estudos, aliados ao ajuste no pós-processamento das imagens foram fundamentais para identificação da posição que o alvo ocupa na cena, e conseqüentemente o movimento que o mesmo desenvolve no plano bidimensional XY. Desta forma, no presente trabalho foram elaborados procedimentos para aquisição de dados sobre deslocamentos angulares, desenvolvido pelo alvo acoplado ao ponteiro do relógio comparador. O pós-processamento da imagem foi desenvolvido através de sub-rotinas implementadas em ambiente Matlab. Destaca-se ainda que, o algoritmo, apesar de utilizar algumas sub-rotinas dos trabalhos anteriores desenvolvido no âmbito do Laboratório Tecnológico de Vibrações Mecânicas (LTVM), não estava preparado para capturar alvos que possuíam rotações em torno de um ponto fixo, e que tal implementação e adaptação foi dos principais objetivos do presente trabalho.

Posteriormente, a presente metodologia foi avaliada por meio de testes experimentais. Em um primeiro momento, utilizou-se um *Shaker* eletromecânico, cuja finalidade foi de desenvolver deslocamentos controláveis de pequena magnitude e baixa frequência, em uma haste metálica. O deslocamento da haste acoplada ao *Shaker* foi capturado simultaneamente, por um sensor de proximidade, previamente calibrado e de forma indireta, por meio de um relógio comparador por uma câmera digital. Os resultados obtidos nos testes iniciais foram satisfatórios, validando a metodologia desenvolvida, e assim, os esforços foram direcionados para a aplicação da mesma em equipamentos em condições reais de operação. Logo, em um segundo momento, a técnica proposta foi submetida a testes realizados em uma máquina rotativa, composto por um motor elétrico acoplado a uma caixa de transmissão do tipo redutora de velocidades e um rotor, que se assemelha aos equipamentos reais, utilizados no mais diversos parques industriais. A aquisição de dados foi realizada de forma análoga ao experimento anterior, e a análise dos resultados se mostrou positivamente interessante e satisfatória, atingindo assim, os propósitos do estudo.

Os resultados obtidos no presente trabalho mostraram que, a partir de uma câmara digital e um instrumento de precisão, do tipo relógio comparador, é possível realizar a detecção e análise de pequenos deslocamentos, menores que as próprias dimensões dos pixels presentes nas imagens, de forma indireta, e que a presente metodologia, poderia ser utilizada futuramente em condições reais de operação.

Observa-se que o desdobramento deste trabalho apresenta uma metodologia alternativa para a identificação e aquisição de sinais de vibração. Possibilitando assim a utilização dos procedimentos desenvolvidos ao longo do presente trabalho na utilização perante o diagnóstico e identificação de defeitos, no que tange o campo da análise de vibrações em máquinas rotativas.

REFERÊNCIAS

- ADAMS, M. L. **“Rotating Machinery Vibration from Analysis to troubleshooting”**. Marcel Dekker, Inc. Nova Iorque, 2001.
- ALBUQUERQUE, M. P. de. ESQUEF, I. A.; ALBUQUERQUE, M. P. de; **“Processamento Digital de Imagens”**. CENTRO BRASILEIRO DE PESQUISAS FÍSICAS – CBPF. Artigo de divulgação científica online. UENF, 2003.
- ALCIATORE, D. G.; Hestand, M. B. **“Introdução à Mecatrônica e aos Sistemas de Medições”**. – 4ª Ed. EUA, Amgh Editora, 2014.
- ALMEIDA, M. T. **“Vibrações mecânicas para engenheiros”**. 2ª edição São Paulo, SP: Edgard Blucher, 1990.
- Alves, D. R. **“Avaliação dos modelos de cores RGB e HSV na segmentação de curvas de nível em cartas topográficas coloridas.”** Dissertação (Mestrado) – Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica. Belo Horizonte, 2010. 65f
- ARAÚJO, E. M. F. M., **“Desenvolvimento de Um Sistema de Medições Livre de Marcadores Utilizando Sensores de Profundidade”**. Campos dos Goytacazes, Rio de Janeiro, Brasil. 2015.
- ARATO JUNIOR, A. **“Manutenção Preditiva: Usando Análise de Vibrações”**. 1. ed. São Paulo: Manole, 2004
- ARTIS, A. Q. **“Silêncio: Filmando”**. 1 ed. Canadá. Focal Press, 2012.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS ABNT. **“Vibração Mecânica – Avaliação da máquina por medições em partes não rotativas”**. NBR ISO 10816-3. Rio de Janeiro, 2011.
- BARTILSON, D. T.; WIEGHAUS, K. T.; HURLEBAUS, S. **“Target-less computer vision for traffic signal structure vibration studies”**. Mechanical Systems and Signal Processing, v. 60, p. 571-582, 2015.

BENTLY, D. E. **“Handbook of Rotordynamics”**. Instituto Memorial Battelle e Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade do Estado de Ohio, EUA, 2005.

BENTLY, D. E. **“Fundamentals of Rotating Machinery Diagnostics”**.1 ed. American Society of Mechanical Engineers – ASME Press, 2003.

BERTON JUNIOR, J. **“Medida de deslocamento em 2D e 3D utilizando câmera digital como sensor sem contato.”** 2016. 103f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Cornélio Procópio, 2016.

BORGES, A. S. **“Análise modal baseada apenas na resposta – decomposição no domínio de frequência”**.123f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira da Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2006.

CARDOSO, A.; BRAGA, P. H. **“Objetos de Aprendizagem no Ensino de Processamento Digital de Imagens”**. Universidade Federal de Uberlândia, Plataforma ResearchGate, 2010.

CASTLEMAN, K. R. **“Digital Image Processing”**. 2. ed. New Jersey: Prentice-Hall, 1995.

FELÍCIO, G. M. G. **“Diagnóstico de Avarias em Máquinas Rotativas Utilizando a Análise de Órbitas”**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica). Instituto Superior de Engenharia de Lisboa, Portugal, 2015.

GORETTI, K. **“Estruturas APS Resistentes à Radiação para Aplicações Espaciais”** 2006. 118pgs. Dissertação (Mestrado em Ciências Em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2006.

GOMIDE, R. L. SENA JUNIOR, D. G. PINTO, F. A. C. QUEIROZ, D. M. **“Metodologia com Base em imagens Binárias obtidas com Limiar Fixo para Classificação de**

Plantas de Milho Atacadas por Spodoptera Frugiperda". XXXI Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola- CONBEA, Salvador, Baia. 2002.

GONZALEZ, R. C. WOODS, R. E. "**Digital Image Processing**". 3. ed. New Jersey: Prentice-Hall, 2007.

GUIMARÃES, L. "**As Cores na Mídia – a Organização da Cor-informação no Jornalismo**". 1ª Ed. São Paulo, Annablume, 2003.

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

KELM, R. D. & PAVELEK, D. "**Orbit Analysis**". Vibration Institute Annual Training Seminar, 1-16. 2012.

KURKA, Paulo R. G. **Vibrações de sistemas dinâmicos: análise e síntese**. 1ª Ed. Rio de Janeiro, Elsevier, 2015.

LAMB, Frank. "**Automação Industrial na Prática**". 8ª Ed. EUA, McGraw-hill, 2015.

LEITE, R. de F. 4, "**Aplicação de Estereoscopia em Imagens Digitais**". Recife, Pernambuco, Brasil. 2014.

LEONARDI, D. M. "**Medida de deslocamentos e vibrações utilizando uma câmera digital como sensor sem contato**." 84f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Cornélio Procópio, PR 2015.

LOBÃO, F. S. "**Calibração com mapeamento das distorções geométricas aplicada a um sistema de visão estéreo**". Dissertação (Mestrado em Engenharia elétrica) - Faculdade de tecnologia da universidade de Brasília, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 2004.

MANUEL, J. **“Sensores de Imagem – Sistemas sensoriais”** Departamento de Engenharia Eletrotécnica - DEE/FCT/UNL. Universidade nova de Lisboa, Quinta da Torre, Portugal, 2005.

MAGALHÃES, F. T. A. de. OLIVEIRA, B. F. S. de. **“Filtragem de Imagens Fixas”**. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. Porto, Portugal, 2005.

MCDANIEL, Don; WYSKIDA, Richard M.; WILHELM, Mickey R. **“A Statistically Based Procedure for Temperature Sensitive Dynamic Cushioning Curve Development and Validation”**. The Shock and Vibration Bulletin, v. 45, p. 7, 1974.

Mello, C.A.B.; A.L.I.Oliveira e W.P.Santos, **“Digital Document Analysis and Processing”**, Nova Science Publishers, 2012.

MITCHELL, J. S. **“From Vibration Measurements to Condition Based Maintenance”** . San Juan Capistrano, California, 2008.

NEPOMUCENO, Lauro Xavier. **“Técnicas de Manutenção Preditiva”**. São Paulo: Blucher, 1989.

NETO, Atrhur Palmeira Ripper Neto. **“Vibrações Mecânicas”**. 1ª Ed. São Paulo, E-papers, 2007.

OPPENHEIM, A. V.; SHAFER, R. W. **“Discrete-Time signal Processing”**, Englewood Cliffs, NJ: Prentice Hall, 1989.

PADILHA, A. J. **“Processamento e Análise de Imagem”**. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. Portugal, 2006.

PESSOA, Marcelo Schneck de Paula.; Spinola, Mauro de Mesquita. **“Introdução à automação : para cursos de engenharia e gestão”**. - 1. ed. - Rio de Janeiro : Elsevier, 2014.

PEREIRA, O. J. **“Método Local de Correção da Distorção da Lente Aplicado a Visão Estereoscópica.”** Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica). Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC. 2014.

RAO, S. “**Vibrações Mecânicas.**” 4ª edição – São Paulo: Pearson, 2009.

SCHEFFER, Cornelius; GIRDHAR, Paresh. “**Practical machinery vibration analysis and predictive maintenance**”. Elsevier, 2004.

SOUTO, R. P. “**Segmentação de Imagem Multiespectral Utilizando-se o Atributo Matiz.**” Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto). Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais INPE, São José dos Campos- SP. 2003.

SOUTHWICK, D. “**Using Full Spectrum Plots**”. Orbit Magazine, 19-21. 1993.

SOUZA, J. S. de. CARDOZA, J. A. S. “**Sensores de Imagem Digitais CCD e CMOS**”. VII Congresso Norte-Nordeste de Pesquisa e Inovação, Palmas – Tocantins. 2012

SOUZA, S. S., LIMA, C. R.C. “**Manutenção centrada em confiabilidade como ferramenta estratégica**”. XXII Encontro Nacional de Engenharia de Produção ENEGEP, Ouro Preto, MG , 2003.

SCURI, A. E. “**Fundamentos da Imagem Digital.**” Rio de Janeiro: Tecgraf/PUC-Rio, 2002.

SUN, Y.; LIU, G. “**Rolling shutter distortion removal based on curve interpolation IEEE Transactions on Consumer Electronics**”. v. 58, p. 1045 – 1050, 2012.

THOMAZINI, D. Albuquerque, P. “**Sensores Industriais – Fundamentos e Aplicações.**” 5ª Ed. São Paulo, Érica, 2005.

ZHANG, Kui; HUANG, Tianshu. “**Managing Sinusoidal Signal Having Frequency Excursion Accomplished with High Order Harmonic**”. In: Signal Processing, 2006 8th International Conference on. IEEE.

ZURICH, N. B. “**CCD versus COMS – has CCD imagining come to end?**” Photogrammetric Week 01, Wichmann, Heidelberg, p. 131-137. 2001.

WANG, J. et. al. “**A new calibration model and method of câmera lens distortion.**” IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems. 2006.

WENDLING, M. "**Sensores.**" Apostila, Colégio Técnico Industrial de Guaratinguetá-
Universidade Estadual Paulista Guaratinguetá-SP. 2010.