

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CENTRO TECNOLÓGICO DE JOINVILLE
CURSO DE ENGENHARIA NAVAL

ALEXANDRE MARTINS GIRALDI

SISTEMA DE RASTREAMENTO DE ALVO PARA MONITORAMENTO DE
MOVIMENTOS: APLICAÇÃO NO ESTUDO DE VIBRAÇÕES FUNDAMENTAIS

Joinville

2018

ALEXANDRE MARTINS GIRALDI

SISTEMA DE RASTREAMENTO DE ALVO PARA MONITORAMENTO DE
MOVIMENTOS: APLICAÇÃO NO ESTUDO DE VIBRAÇÕES FUNDAMENTAIS

Trabalho apresentado como requisito para
obtenção do título de bacharel no Curso de
Graduação em Engenharia Naval do Centro
Tecnológico de Joinville da Universidade
Federal de Santa Catarina.

Orientador: Dr. André Luís Candino Fujarra.

Joinville

2018

ALEXANDRE MARTINS GIRALDI

SISTEMA DE RASTREAMENTO DE ALVO PARA MONITORAMENTO DE
MOVIMENTOS: APLICAÇÃO NO ESTUDO DE VIBRAÇÕES FUNDAMENTAIS

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi julgado adequado para obtenção do título de bacharel em Engenharia Naval, na Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico de Joinville.

Joinville, 27 de novembro de 2018.

Banca Examinadora:

Dr. Andre Luís Condino Fugarra

Orientador

Presidente

Universidade Federal de Santa Catarina

Dr. Marcos Alves Rabelo

Membro

Universidade Federal de Santa Catarina

Dr. Thiago Antonio Fiorentin

Membro

Universidade Federal de Santa Catarina

Aos meus pais
Marcos Antonio Giraldi e
Márcia Cargnin Martins Giraldi

AGRADECIMENTO

Gostaria de agradecer primeiramente aos meus pais, irmã, madrinha, avó e namorada por terem feito parte deste caminho percorrido, no qual sempre me apoiaram, incentivaram e fizeram o possível para que eu alcançasse meus objetivos mesmo quando para mim parecia não haver um caminho claro.

Agradeço os meus amigos que sempre estiveram comigo me apoiando e incentivando mesmo que de longe. Em especial ao meu grande amigo Guilherme M. Mendes que se fez presente em todas as fases da minha formação acadêmica.

Por último e muito importante, agradeço o meu orientador André Luis Condino Fugarra por sempre estar disposto a conversar e discutir sobre os mais diversos temas, sempre compartilhando sua imensa experiência e visão.

RESUMO

O objetivo deste estudo foi desenvolver uma ferramenta de medição de movimento, por meio do processamento digital de imagem, utilizando dispositivos de baixo custo e programa livre, que possa ser aplicada em experimentos de engenharia naval. Assim, para realização deste trabalho foi necessário desenvolver um código, utilizando programa livre e uma câmera de vídeo de baixo custo. Para isto, a ferramenta foi desenvolvida com base nas técnicas de processamento citadas, partindo de exemplos simples, buscando a verificação e validação da aplicação das mesmas. O desenvolvimento transitará, entre o rastreamento, em uma única dimensão, para validação gradativa do código, visando uma aplicação bidimensional. Para a validação do código, foi utilizado o método experimental, no qual os resultados obtidos por meio do PDI foram confrontados com um método, o método analítico. Após a execução e análise individual dos ensaios com o pêndulo simples foi possível demonstrar a capacidade de captura do movimento em dois graus de liberdade pelo sistema e considerando as fontes de erro durante a elaboração dos ensaios, os resultados de precisão em torno de 2,12% são considerados aceitáveis para esta ferramenta. Ao longo do desenvolvimento deste trabalho foram realizadas diversas alterações no código de tal maneira que este agora é capaz de realizar o processamento dos dados sem atraso para uma frequência de captura de 30 *frames* por segundo.

Palavras-chave: Rastreamento, Pêndulo Simples, Processamento de Imagens Digitais, Ferramenta de rastreio. Dois Graus de Liberdade.

ABSTRACT

The objective of this study was to develop a motion measurement tool, using digital image processing, allied using low cost and free program devices, which can be applied in naval and oceanic engineering experiments. Thus, to carry out this work was necessary to develop a code, using free program and a video camera of low cost. For this, the tool was developed based on the mentioned processing techniques, starting from simple examples, seeking the verification and validation of the application of the same ones. The development will transit, through the tracking, in a single dimension, for gradual validation of the code, aiming at a two-dimensional application. For the validation of the code, the experimental method was used, in which the results obtained through the PDI were confronted with a method, the analytical method. After the execution and individual analysis of the tests with the simple pendulum it was possible to demonstrate the ability to capture the movement in two degrees of freedom by the system and considering the sources of error during the elaboration of the tests, the results of precision around 2,12 % are considered acceptable for this tool. Throughout the development of this work several changes have been made in the code in such a way that it is now able to perform data processing without delay for a capture frequency of 30 frames per second.

Keywords: Tracking, Simple Pendulum, Digital Image Processing, Trace Tool, Two Degrees of Freedom.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Cubo do modelo RGB.....	11
Figura 2 – Hexacone do modelo HSV.....	12
Figura 3 – Diferença entre os modelos HSV e RGB.....	12
Figura 4 – Redimensionamento da imagem.....	13
Figura 5 – Principais operações morfológicas.....	15
Figura 6 – (a) imagem original, (b) objetos em vermelho e (c) objetos em verde.....	16
Figura 7 – Sistemas de coordenadas.....	17
Figura 8 – Sistema massa-mola.....	20
Figura 9 - Modelo simplificado de plataforma.....	22
Figura 10 – Representação do pêndulo.....	23
Figura 11 – <i>Webcam</i> HP modelo Hd-4110.....	25
Figura 12 – Suporte e câmera.....	27
Figura 13 – Distorções da imagem capturada.....	28
Figura 14 – Alinhamento do plano de fundo milimetrado.....	32
Figura 15 – Pêndulo deslocado na condição inicial de 20 milímetros.....	32
Figura 16 – <i>Frame</i> retirado durante o processamento do primeiro ensaio.....	33
Figura 17 – Sobreposição da trajetória rastreada (vermelho) sobre a analítica (azul).....	34
Figura 18 – Sobreposição da trajetória rastreada (vermelho) sobre a analítica (azul).....	36
Figura 19 – Sobreposição da trajetória rastreada (vermelho) sobre a analítica (azul).....	38
Figura 20 – Sistema massa mola com 2GDL.....	39
Figura 21 – Rastreamento em execução.....	40
Figura 22 – Amplitude de movimento no eixo x	40
Figura 23 – Amplitude de movimento no eixo y	41
Figura 24 – Sistema de 2GDL calibrado.....	42
Figura 25 – Relação velocidade x ângulo inicial.....	43

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Custos envolvidos até no sistema pendular	29
Quadro 2 – Fontes de erro	43

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Resultados do primeiro ensaio.....	33
Tabela 2 – Condições iniciais e velocidade máxima do primeiro ensaio.....	35
Tabela 3 – Resultados do segundo ensaio	35
Tabela 4 – Condições iniciais e velocidade máxima do segundo ensaio	36
Tabela 5 – Resultados do terceiro ensaio	37
Tabela 6 – Condições iniciais e velocidade máxima do terceiro ensaio.	38

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

1GDL – Um Grau de Liberdade

2GDL – Dois Graus de Liberdade

CCD – *Charge Coupled Device*

CMOS – *Complementary Metal Oxide Semiconductor*

DLT – *Direct Linear Transformation*

HSV – *Hue Saturation Value*

IPT – Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo, Brasil

PDI – Processamento Digital de Imagem

RGB – Red Green Blue

LISTA DE SÍMBOLOS

δ – Desvio Padrão

λ – Distância Focal

ω_n – Frequência Natural

t – Tempo

f – Frequência

T – Período

m – Massa

l – Comprimento Do Fio Do Pêndulo

g – Aceleração da Gravidade

θ – Ângulo de Deslocamento Inicial

\ddot{x} – Aceleração

t – Espessura

Δx – Deslocamento no eixo x

Δy – Deslocamento no eixo y

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	6
1.1 OBJETIVOS	8
1.1.1 Objetivo Geral	8
1.1.2 Objetivos Específicos	8
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	8
2.1 PROCESSAMENTO DIGITAL DE IMAGENS	9
2.1.1 Processamento de Imagens	9
2.1.2 Aquisição e armazenamento de imagens	10
2.1.3 Modelos de cores: RGB e HSV	10
2.1.4 Redimensionamento	12
2.1.5 Filtragem Gaussiana	13
2.1.6 Operações Morfológicas	14
2.1.7 Segmentação de Imagens: limiarização	15
2.1.8 Detecção de Bordas	16
2.1.8.1 Seguidores de fronteira e descrição de forma	16
2.2 CALIBRAÇÃO DA CÂMERA	16
2.2.1 Sistema de coordenadas	17
2.2.2 Vantagens e desvantagens	18
2.2.3 Aplicações na Engenharia Naval e Oceânica	19
2.3 VIBRAÇÕES FUNDAMENTAIS	19
2.3.1 O MOVIMENTO HARMÔNICO SIMPLES	19
2.3.2 Sistema Pendular	22
2.3.2.1 Modelagem Matemática	23
3 Materiais e Método	25
3.1 MATERIAIS	25
3.1.1 CÂMERA E SUPORTE	25
3.1.2 Calibração do sistema	27
3.1.2.1 Sistema de cores	27
3.1.2.2 Sistema de coordenadas	28
3.1.3 Pêndulo simples	29
3.2 MÉTODO	30
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES	31
4.1 EXPERIMENTOS COM O PÊNDULO SIMPLES	31

4.1.1 Primeiro Ensaio	31
4.1.2 Segundo ensaio.....	35
4.1.3 Terceiro ensaio.....	37
4.1.4 Sistema com 2GDL	38
4.2 ANÁLISE DOS ENSAIOS.....	42
5 CONCLUSÕES E PERSPECTIVAS.....	44
REFERÊNCIAS	45
APENDICE A – Ferramenta de Rastreo	47
ANEXO A - Especificações técnicas da câmera utilizada.....	49

1 INTRODUÇÃO

O estudo das vibrações teve início por volta de 4000 a.C. tendo como objetivo o estudo da música, mais especificamente, o aprimoramento dos instrumentos de corda. Por volta de 1500 a.C. Pitágoras iniciou estudos relacionados à música com base científica. A história conta que um dia entediado Galileu Galilei, fundador da ciência experimental, começou a analisar o movimento oscilatório de um pêndulo simples. Em seu livro publicado em 1638, *“Discourses concerning two new sciences”*, Galileu descreveu a dependência entre frequência de vibração e o comprimento do fio do pêndulo simples e o fenômeno da ressonância. Isaac Newton publicou em 1686 sua obra mais famosa, chamada *“Philosophia naturalis principia mathematica”*, e descreveu a lei da gravitação além das três leis do movimento. A segunda lei é utilizada ainda nos dias de hoje em livros modernos para derivar as equações de movimento de um corpo em vibração.

A física está presente em nosso dia-a-dia e apresenta-se de diversas formas, das mais simples às mais complexas, quais sejam: nos estudos musicais, nas ondas que quebram na praia, nas grandes hélices que propulsionam as embarcações e os motores à combustão, nos laboratórios que desenvolvem sistemas cada vez menos responsivos às excitações - como as plataformas para extração de petróleo que devem apresentar mínimo movimento visando a integridade do sistema. Nos principais laboratórios e institutos de pesquisa de Engenharia Naval e Oceânicos pelo mundo, assim como o IPT (Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo, Brasil), novos projetos são encomendados e analisados diariamente. Dentre os estudos realizados, uma grande quantidade diz respeito a pesquisas voltadas às vibrações e aos movimentos de sistemas hidrodinâmicos.

Devido à natureza complexa dos modelos e dos movimentos que estes apresentam, utilizar metodologias invasivas, como os acelerômetros, por vezes não são aplicáveis. Uma forma de realizar o monitoramento de movimentos é por intermédio do processamento de imagens digitais, método que vem ganhando destaque em diversas áreas da pesquisa.

O estudo de sistemas oscilatórios é de grande interesse para os engenheiros navais e oceânicos. Estes sistemas, além de representarem satisfatoriamente sistemas reais, como o comportamento dinâmico de uma estrutura semissubmersível, plataforma semissubmersível ou embarcação, respondendo, por exemplo, com movimento de *roll*, os estudos de sistemas

oscilatórios também podem ser aplicados para atenuação da vibração, sejam para sua redução, visando conforto, seja para amenizar o risco de falhas estruturais por fadiga.

A descrição de movimento por processamento de imagem fornece grande quantidade de informações, as quais podem ser geradas em dado intervalo de tempo, quando comparada aos demais métodos (JAHNE, 1993). Tal técnica tem muito potencial para prover dados que revolucionem o estudo das ondas e sistemas oscilatórios de maneira não intrusiva.

A medição de movimentos por processamento de imagens tem uso pouco expressivo no âmbito acadêmico devido ao alto custo de implementação. Quando realizada por meio do PDI, o método mais utilizado é aquele baseado em câmeras de alta resolução, as quais, quando à prova d'água, encarecem o método, tornando-o mais dispendioso. (GARRET, 2016). Esta forma de abordagem, quando comparada às convencionais (sensores e equipamentos invasivos), zela por não interferir nas simulações realizadas.

Dentre as formas de se realizar a medição de movimentos por processamento de imagens, segundo Amarante (2010), para realizar a mensuração dos deslocamentos almejados, algumas técnicas computacionais de processamento de imagens e calibração de câmeras são necessárias. Para a calibração das câmeras, existem vários métodos, tais como o de Tsai (1987), de Zhuang (1996) e da transformada linear direta (DLT, do inglês). Estes métodos apresentam diferentes níveis de requerimento computacional e precisão, sendo que o método DLT se mostra mais eficiente, segundo estes aspectos. (AMARANTE, 2010). De acordo com o mesmo autor, o processamento das imagens se vale de procedimentos interconectados, os quais são indispensáveis. Este processo tem início com a aquisição da imagem, a qual é feita por um dispositivo sensível a certa banda do espectro eletromagnético, sendo dependente da luminosidade a que o objeto está sujeito. (BRAGA, 2014). Amarante (2010) mostrou ser necessária a utilização de algumas técnicas de processamento de imagens, como limiarização e segmentação das imagens, operações de dilatação e erosão, além de filtros para suavização da imagem, como o filtro mediana para facilitar o rastreamento do alvo.

A medição por processamento de imagens pode ser empregada em diversas linhas de estudo, como no comportamento dinâmico de um modelo simplificado de uma embarcação sob atuação da onda e demais movimentos oscilatórios que compõe a grande área do estudo de vibrações. Segundo Fonseca (1960), o movimento de balanço é caracterizado de forma que o navio inclina-se de um lado para o outro, de bombordo para boreste e vice-versa, sendo causado no momento em que ocorre o encontro das ondas com a embarcação, obstando seu equilíbrio.

Diante do exposto, o objetivo deste estudo foi desenvolver uma ferramenta de medição de movimento, por meio do processamento digital de imagem, utilizando dispositivos de baixo custo e programa livre, que possa ser aplicada em experimentos de engenharia naval. Assim, para realização deste trabalho foi necessário desenvolver um código, utilizando programa livre e uma câmera de vídeo de baixo custo. Para isto, a ferramenta foi desenvolvida com base nas técnicas de processamento citadas, partindo de exemplos simples, buscando a verificação e validação da aplicação das mesmas. O desenvolvimento transitará, desde o rastreamento, em uma única dimensão, para validação gradativa do código, visando uma aplicação bidimensional.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo Geral

O presente trabalho teve como objetivo desenvolver uma ferramenta de medição de movimentos por processamento de imagens de baixo custo, aplicada a experimentos de engenharia naval.

1.1.2 Objetivos Específicos

- Identificar os procedimentos de processamento de imagens de fácil rastreamento, como a oscilação vertical de um alvo conhecido;
- Aplicar métodos de processamento de imagens com filtros de ruídos para melhor precisão no rastreamento;
- Desenvolver um código em fonte aberta;
- Aplicar o código elaborado para o sistema bidimensional;
- Disponibilizar a ferramenta desenvolvida para a comunidade acadêmica;
- Utilizar materiais e programa de baixo custo.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste capítulo serão apresentadas as técnicas de processamento de imagem, dada a sua relevância para o desenvolvimento deste trabalho, bem como algumas aplicações do PDI (Processamento Digital de Imagens) no âmbito da Engenharia Naval e Oceânica. Por fim, será apresentada a modelagem matemática do sistema vibracional abordado neste trabalho.

2.1 PROCESSAMENTO DIGITAL DE IMAGENS

Segundo Gonzales e Woods (2003), a representação da imagem digital é dada por uma função bidimensional da intensidade da luz $f(x,y)$ onde x e y denotam coordenadas espaciais no plano e f representa o valor do nível de cinza em cada ponto da imagem.

Para a imagem ser digitalizada e armazenada, deve ser discretizada, isto é, torná-la contínua, captada pelos sensores das câmeras em inúmeros pontos que constituirão uma matriz de coordenadas (Equação 2), contendo as informações de intensidade luminosa i e refletividade r e f de cada ponto (Equação 1). Logo, a representação da função bidimensional se dá na forma de:

$$f(x, y) = i(x, y) \cdot r(x, y) \quad (1)$$

$$A_{M \times N} = \begin{bmatrix} f(0,0) & f(0,1) & \dots & f(0, N-1) \\ f(1,0) & f(1,1) & \dots & f(1, N-1) \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ f(M-1,0) & \dots & & f(M-1, N-1) \end{bmatrix} \quad (2)$$

Vídeos digitais são constituídos por uma sequência de imagens digitais denominadas *frames*. Seu processamento é equivalente ao das imagens digitais, sendo que cada *frame* constitui uma imagem digital, podendo ser processado com as mesmas técnicas de análise de imagens digitais.

2.1.1 Processamento de Imagens

De acordo com Gonzales e Woods (2003), o processamento de imagens digitais é constituído de técnicas que são, em sua maioria, apresentados na forma de algoritmos. De modo

geral apenas a aquisição e a visualização das imagens são efetuadas por hardwares especializados devida maior velocidade.

No decorrer deste item serão discutidas as principais técnicas de PDI envolvidas no desenvolvimento deste trabalho. Com início na aquisição das imagens até as operações necessárias para realizar a medição de movimentos anteriormente proposta.

2.1.2 Aquisição e armazenamento de imagens

O processo de aquisição de imagens é realizado por um equipamento sensível a uma certa banda de ondas eletromagnéticas, como raios X, espectro visível ou infravermelho. Este equipamento deve fornecer sinais elétricos proporcionais à intensidade de ondas a que o mesmo está exposto. Atualmente, este processo é realizado por dois tipos de sensores: *charge coupled device* (CCD) e *complementary metal oxide semiconductor* (CMOS), (GORETTI, 2006).

Os sensores do tipo CCD transferem os sinais elétricos de forma analógica e os lê com um chip de forma matricial em sequência, fazendo um digitalizador, que é responsável por transformar sinais elétricos físicos em sinais digitais. Por outro lado, os do tipo CMOS transferem os sinais elétricos recebidos em sinais digitais através de transistores.

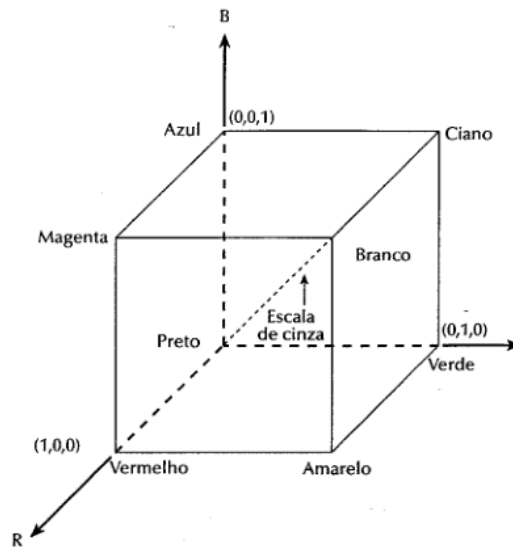
Ainda sobre os dois tipos de sensores, Souza e Cardoza (2009) afirmam que os do tipo CMOS têm conquistado maior parte do mercado nos últimos anos, seja em câmeras simples como *webcam* e celulares básicos, seja em câmeras profissionais devido à evolução de tal tecnologia. Estes sensores hoje apresentam sinais livres de ruídos que resultam em maior qualidade aliados à velocidade superior aos CCDs,

2.1.3 Modelos de cores: RGB e HSV

O modelo RGB (*red, green and blue*) é composto pelas três cores: vermelho, verde e azul que dão origem ao seu nome, vermelho, verde e azul. As imagens representadas por este modelo são compostas por matrizes 3D que podem ser decompostas em três matrizes 2D diferentes sobrepostas, sendo que cada uma é ligada a uma de suas cores primárias.

Sua estrutura 3D pode ser vista na Figura 1, onde é possível notar as cores nos vértices do cubo. As demais cores podem ser encontradas no subespaço deste cubo, seja percorrendo as arestas ou em coordenadas em seu interior, (GONZALES e WOODS, 2003).

Figura 1 – Cubo do modelo RGB

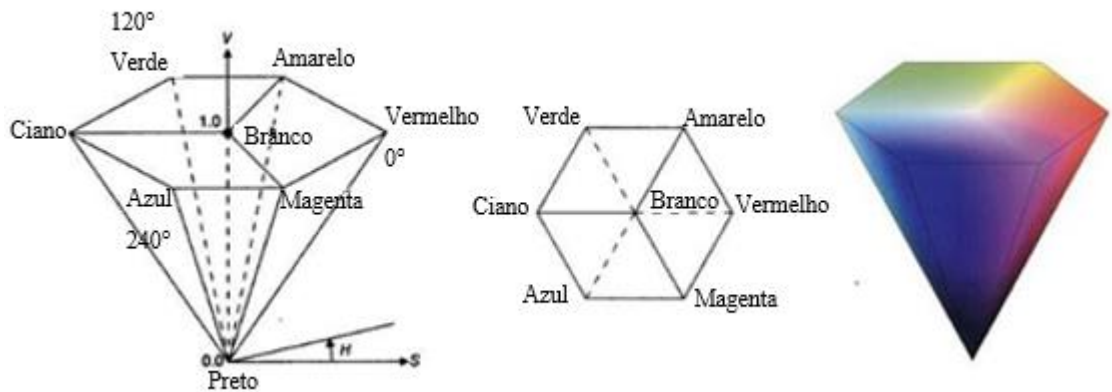


Fonte: Adaptado de Gonzalez e Woods (2003).

O sistema RGB, no entanto, apresenta uma grande desvantagem em relação ao modelo HSV se tratando da definição das cores por parte da percepção visual humana, ou seja, não é garantido que as cores do sistema RGB sejam fidedignas à percepção visual (ALVES, 2010).

Por outro lado, o modelo HSV (*hue saturation value*), ou matriz, saturação e valor, que da mesma forma apresenta três parâmetros principais, pode ser representado por um cone ou um hexacôno, conforme a Figura 2. Neste modelo, a matriz representa a cor, a saturação e a pureza da cor, sendo que o número 1 representa a cor em si e valores menores apresentam acréscimo de branco. O valor diz respeito ao brilho da cor e deste são criados os sombreamentos (ALVES, 2010). De acordo com Gonzales e Woods (2003) a conversão entre os modelos pode ser realizada nas duas vias.

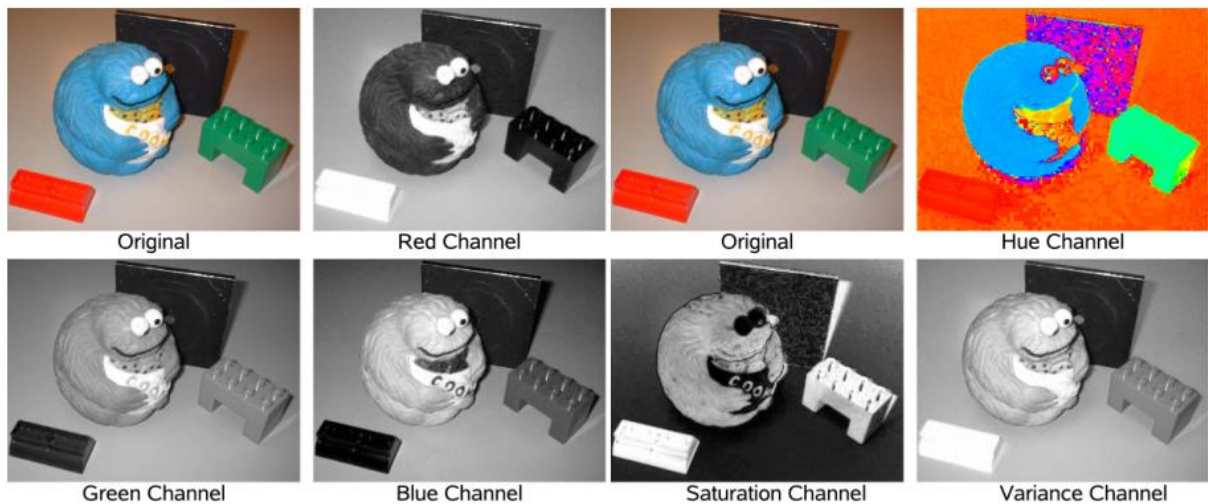
Figura 2 – Hexacone do modelo HSV



Fonte: Adaptada de Bhatia (2008) e Russ (2007).

Este modelo é utilizado no PDI devido a sua maior semelhança com a percepção humana das cores, desta forma, a detecção do alvo em questão é facilitada, como pode ser visto na Figura 3.

Figura 3 – Diferença entre os modelos HSV e RGB



Fonte: Adaptado de Solomon (2015).

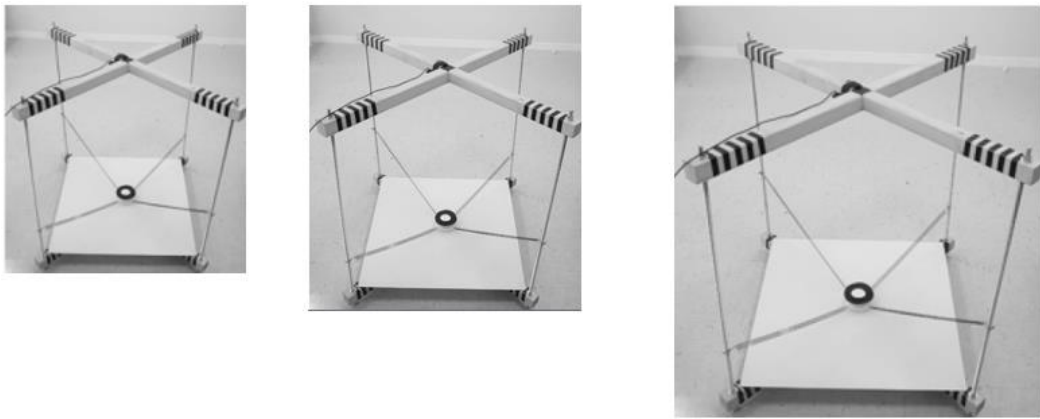
2.1.4 Redimensionamento

O redimensionamento é utilizado com intuito de alterar as dimensões da imagem. Esta etapa é crucial enquanto tem-se como objetivo a atenuação do custo computacional envolvido no processamento de cada *frame*. (FILHO; NETO, 1999).

Durante este processo, a imagem pode ter seu tamanho físico aumentado ou diminuído, alterando o tamanho de todos os *pixels* pertencentes à imagem. Para o aumento, é visível a redução do contraste, e para a redução, algumas camadas podem deixar de existir quando se tornam inferiores a um *pixel* (Gonzales; Woods, 2003).

Podem ser observadas na sequência representada abaixo a imagem reduzida, a original e a aumentada, da mesma forma que os efeitos do redimensionamento foram apresentados anteriormente:

Figura 4 – Redimensionamento da imagem



Fonte: Autor (2018).

2.1.5 Filtragem Gaussiana

De acordo com Gonzales e Woods (2003), a suavização da imagem é utilizada para redução de ruídos e de borramento. Este objetivo é alcançado através da substituição de cada *pixel* pela média ponderada dos *pixels* vizinhos.

Da mesma forma que os filtros “passa Baixa” e “passa Média”, que funcionam permitindo a passagem das baixas frequências, o filtro Gaussiano tem como objetivo reduzir os ruídos presentes na imagem e ressaltar a sua estrutura.

O nome “filtro Gaussiano” é herdado da função Gaussiana, apresentada na Equação 3. Onde G é a distribuição gaussiana, δ o desvio padrão, e por fim x e y compõem a coordenada do ponto. Esta função é utilizada na implementação do filtro, na qual o desvio padrão determina o grau de suavização e a dimensão da matriz ($N \times N$) e a dimensão da vizinhança. Assim, quanto maior for o desvio e a matriz, mais suavizada será a imagem processada (JESUS; COSTA, 2015).

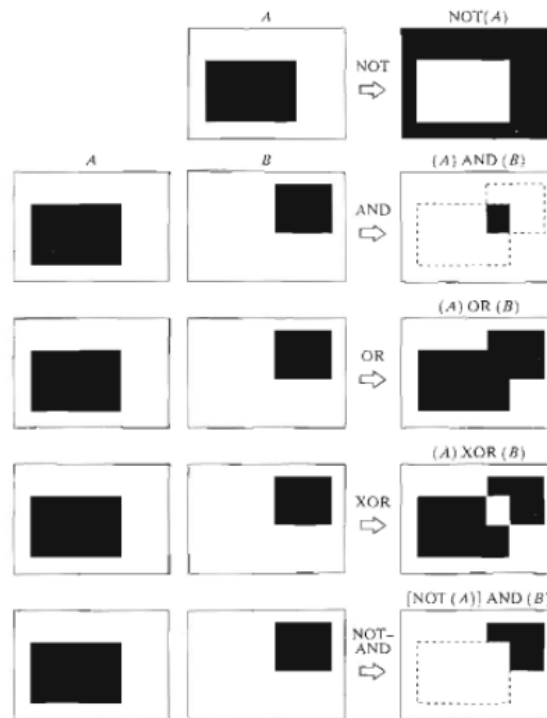
$$G(x, y) = \frac{1}{2\pi\delta^2} e^{-\frac{x^2+y^2}{2\delta^2}} \quad (3)$$

2.1.6 Operações Morfológicas

A morfologia matemática é utilizada com o objetivo de ressaltar e extrair componentes desejados da imagem além da decomposição e filtragem de ruído, desta forma, a representação da região de interesse é viabilizada. Para que este processo ocorra, é feita aplicação da teoria dos conjuntos. A Figura 5 mostra os principais operadores e operações. Além das operações morfológicas, neste trabalho foram utilizadas as de erosão e dilatação:

- Erosão: operação de uma imagem binária na qual um elemento de *pixel* branco é comparado com a vizinhança e, se caso algum destes sejam pretos, o mesmo passará a ser preto. Em termos práticos, um contorno apresenta sua espessura reduzida após esta operação (GONZALES; WOODS, 2003).
- Dilatação: é a operação em que o elemento central é o *pixel* preto e, se algum elemento de sua vizinhança for branco, o mesmo passa a ser igualmente branco. Em termos práticos, após esta operação um contorno adquire maior espessura (GONZALES E WOODS, 2003).

Figura 5 – Principais operações morfológicas



Fonte: Gonzales e Woods (2003).

2.1.7 Segmentação de Imagens: limiarização

Segundo Gonzales e Woods (2003), a limiarização é uma das mais importantes abordagens para a segmentação de imagens. Isto se deve através do funcionamento desta operação, que atua utilizando um limiar T , que define os limites inferior, $(HSV)_{min}$ e superior $(HSV)_{max}$. A função percorre a imagem comparando *pixels* com T . Caso a região pertença ao conjunto, ela obtém valor unitário tornando-se branca, por outro lado, caso não pertençam ao conjunto, atribui-se o valor zero e a região fica preta.

Formalmente a limiarização de uma imagem pode ser descrita pela Equação 4.

$$f(x, y) = \begin{cases} 1 & \text{se } (H, S, V)_{min} \leq (H, S, V)_{(x,y)} \leq (H, S, V)_{max} \\ 0 & \text{se não} \end{cases} \quad (4)$$

De modo a tornar esta operação mais clara, parte do código foi utilizada para elaborar a Figura 6 onde uma imagem do padrão HSV foi limiarizada com objetivo de apresentar apenas as regiões de interesse para a seleção do meio círculo vermelho e também da outra metade em verde.

Figura 6 – (a) imagem original, (b) objetos em vermelho e (c) objetos em verde



Fonte: Autor (2018).

2.1.8 Detecção de Bordas

A detecção de bordas é o processo em que os contornos da região de interesse são extraídos. Para isto, a função percorre a imagem e por meio das variações de intensidade considera ou não um contorno dependendo do limiar de transição adotado.

Conceitualmente, a detecção de bordas parece ser um problema bastante trivial como o de limiarização, entretanto Solomon e Breckon (2015) afirmam que esta ainda é uma área em desenvolvimento e consideravelmente complexa.

2.1.8.1 Seguidores de fronteira e descrição de forma

Seguidores de fronteiras são técnicas largamente utilizadas no PDI que identificam e percorrem as fronteiras na imagem e armazenam este caminho em listas ou matrizes. Esse processo se dá através de listas que descrevem as fronteiras, definindo parâmetros para avaliar se estes pontos formam uma figura geométrica conhecida, como um alvo circular, por exemplo. Após a validação desta lista, tem-se o contorno da região de interesse.

2.2 CALIBRAÇÃO DA CÂMERA

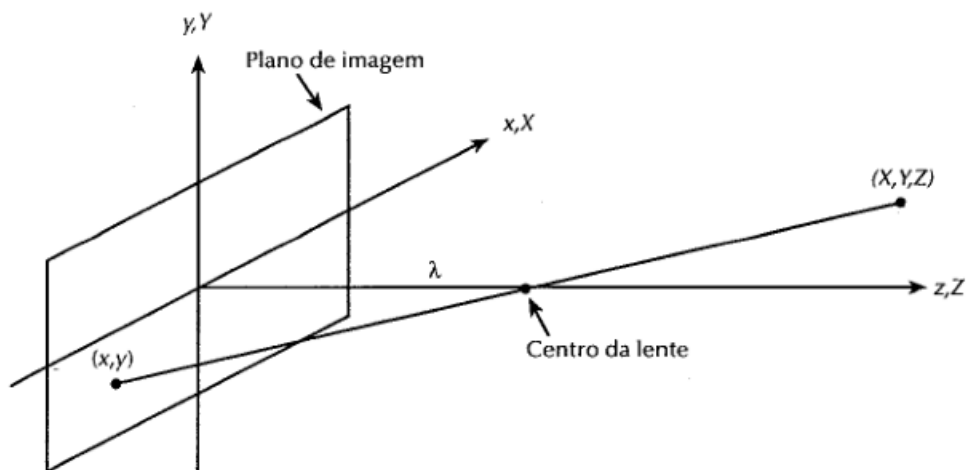
Segundo Souza e Cardoza (2012), o processo de calibração visa estimar os seus parâmetros intrínsecos, como a distância focal e fator de escala, assim como os parâmetros extrínsecos, que são definidos pelo posicionamento da câmera empregada na análise. Métodos de calibração de câmeras, como citados no primeiro capítulo, podem ser encontrados em Dias (2015) e Amarante (2010).

Desta forma, a calibração é tida como construção de correspondências entre dois planos coordenados: o plano onde é encontrado o objeto e o plano da imagem que o representa digitalmente. Para que esta correlação seja construída, é usual tratar as coordenadas como homogêneas, desta forma, as transformações realizadas são feitas de forma consciente (Dias, 2015).

2.2.1 Sistema de coordenadas

Para correlacionar as coordenadas digitais (x, y) , dadas em *pixels*, anteriormente apresentadas como $f(u, v)$, e as coordenadas do objeto real, medidas em metros pelo sistema internacional de medidas (SI), comumente representadas por (X, Y, Z) , é necessário saber onde está a origem de cada sistema. Uma vez que os sistemas de coordenadas estejam alinhados, como mostra a Figura 7, o ponto central de foco da câmera situa-se em $(0, 0, \lambda)$ que representa a origem do plano de imagem (x, y) e λ a distância focal. Desta forma, é possível relacioná-los utilizando de trigonometria.

Figura 7 – Sistemas de coordenadas



Fonte: Gonzales e Woods (2003).

Utilizando a semelhança de triângulos conforme apresentado na Figura 7, é possível obter as relações entre as coordenadas apresentadas pelas Equações 5 e 6. Vale ressaltar que os sinais negativos surgem devido à projeção do objeto que acontece de forma invertida no plano digital, motivada pelo modelo de câmera conhecido como “buraco de agulha”, do inglês “*pinhole*”.

$$\frac{x}{\gamma} = -\frac{X}{Z - \lambda} = \frac{X}{\lambda - Z} \quad (5)$$

$$\frac{y}{\gamma} = -\frac{Y}{Z - \lambda} = \frac{Y}{\lambda - Z} \quad (6)$$

Desta forma, as coordenadas na imagem são descritas por:

$$x = \frac{\lambda X}{\lambda - Z} \quad (7)$$

$$y = \frac{\lambda Y}{\lambda - Z} \quad (8)$$

Assim, é possível realizar a conversação destes sistemas coordenados. Vale ressaltar que efeitos como as distorções que acontecem na captura da imagem não são considerados no presente estudo.

2.2.2 Vantagens e desvantagens

Devido à natureza não invasiva do método de medição por meio do processamento digital, ele passa a ser bem-aceito e largamente utilizado em laboratórios de pesquisa e de desenvolvimento em setores diversos, como para o estudo da biomecânica, da cinematografia e do desenvolvimento de jogos. Da mesma forma, sua aplicação se estende à Engenharia Naval, como em tanques de teste onde, por vezes, os modelos em estudo não podem ser instrumentados com acelerômetros devido à interferência que os mesmos acarretam no comportamento dinâmico do modelo, gerando alteração do centro de gravidade e da frequência de vibração natural. De forma objetiva, este método de medição digital mostra-se não invasivo, com possibilidade de alta precisão e com ampla gama de aplicação.

Partindo do princípio que as câmeras de alta velocidade, por vezes subaquáticas, são necessárias para uma captura suficiente de pontos, tem-se um método de alto custo, em torno de US\$ 30.000,00, valor impraticável para grande parte das universidades e centros de pesquisa. Todavia, com a evolução das câmeras digitais e o aumento constante nas aplicações bem como

o desenvolvimento de novos sistemas que promovem o estudo da dinâmica dos corpos, seu custo de implementação, em breve, não será mais um limitante.

2.2.3 Aplicações na Engenharia Naval e Oceânica

Este método vem sendo utilizado em larga escala no que se diz respeito às aplicações no ramo da Engenharia Naval, como no estudo do comportamento de vibrações de linhas de ancoragem e amarração (AMARANTE, 2010). A medição de movimento de outros sistemas oscilatórios, como plataformas e embarcações, podem ser estudadas com auxílio do processamento de imagens digitais, como acontece no IPT, em competições estudantis, onde busca-se a minimização de oscilação de sistemas flutuantes.

2.3 VIBRAÇÕES FUNDAMENTAIS

Conceitos de vibrações fundamentais são significativos no presente trabalho. Uma vez que os resultados de trajetória, obtidos utilizando a ferramenta aqui elaborada, serão sujeitos a uma comparação frente aos resultados analíticos.

2.3.1 O MOVIMENTO HARMÔNICO SIMPLES

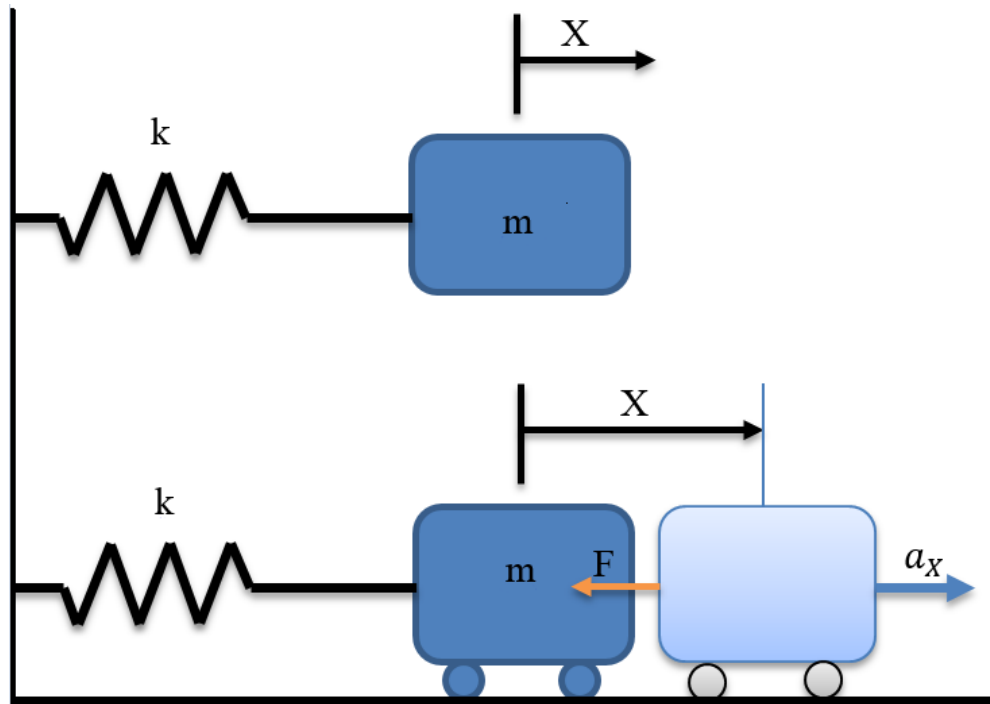
Para que a oscilação mecânica ocorra, o sistema deve possuir duas grandezas: a elasticidade e a inércia. Dada uma condição inicial de deslocamento, este sistema tende a voltar para sua posição de equilíbrio devido à inércia do mesmo através da força restauradora. Este movimento é regido pela constante transformação de energia, alterando-se da energia potencial, quando este se encontra fora da posição de equilíbrio, para a cinética, quando está em movimento dando origem ao movimento oscilatório.

A frequência natural de oscilação (Equação 9) é relacionada diretamente com as grandezas anteriormente mencionadas – inércia e elasticidade – e é comumente representada por ω_n .

$$\omega_n = \sqrt{\frac{\text{Elasticidade}}{\text{Inércia}}} = \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (9)$$

O sistema que de maneira mais simples apresenta o movimento harmônico simples é o da massa-mola, representando na Figura 8. Nesse sistema a mola representa o elemento que dá elasticidade ao sistema, por meio de uma rigidez “ k ” dada em Newton sobre metro [N/m] e massa desprezível; a massa é considerada concentrada em seu centroide e medida em Newton.

Figura 8 – Sistema massa-mola



Fonte: Autor (2018).

Aplicando a Segunda Lei de Newton (Equação 10) na equação do movimento com base no diagrama de corpo livre (Equação 11) apresentado na figura acima, encontra-se a equação do movimento que descreve o sistema. Isto pode ser observado na sequência:

$$F(t) = m\ddot{x} \quad (10)$$

$$m\ddot{x} + kx = 0 \quad (11)$$

A solução geral da equação diferencial é demonstrada a seguir:

$$x(t) = A \operatorname{sen} \omega_n t + B \operatorname{cos} \omega_n t \quad (12)$$

Na equação acima, as constantes A e B podem ser encontradas por meio das condições iniciais derivando a equação no ponto em $t = 0$:

$$A = \frac{\dot{x}(0)}{\omega_n} = x_o \quad (13)$$

$$B = x(0) = \frac{\dot{x}_o}{\omega_n} \quad (14)$$

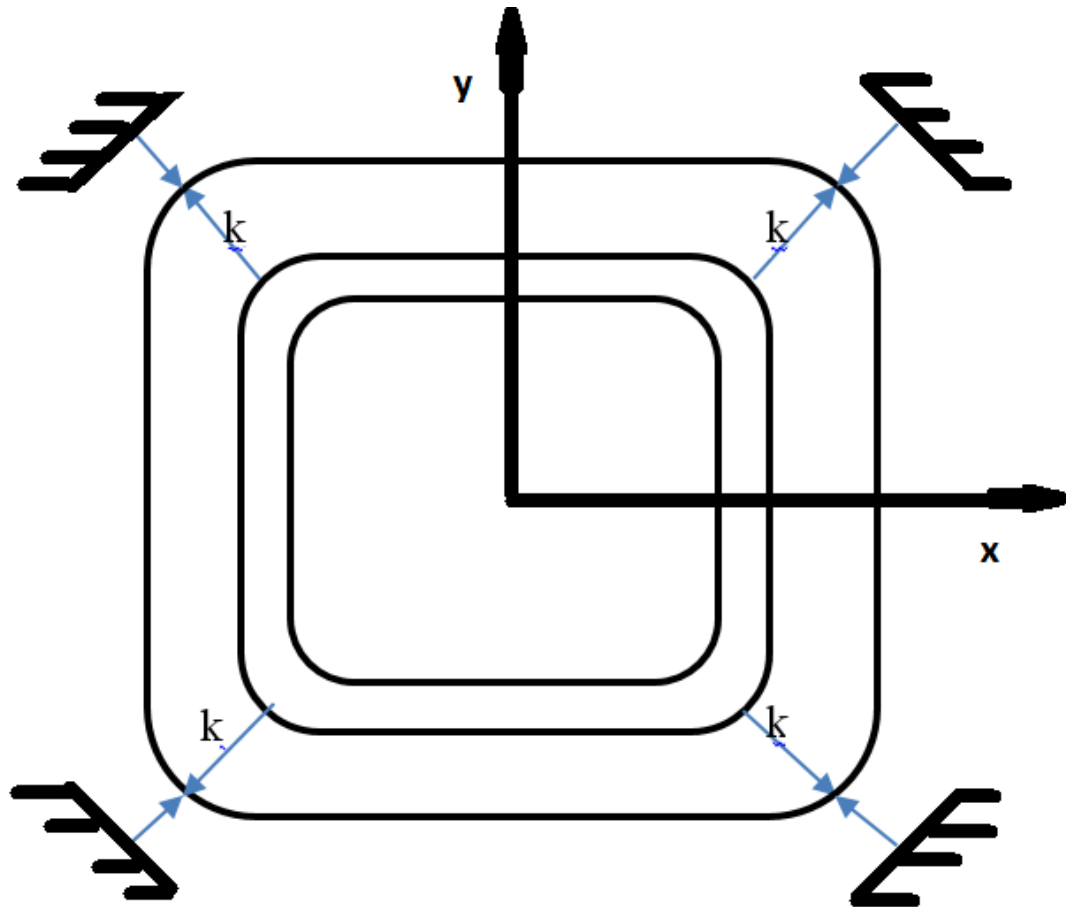
$$x(t) = A \cos(\omega_n t - \varphi) \quad (15)$$

A frequência f de oscilação do movimento em ciclos por segundo é expressa da forma $f = \left(\frac{\omega_n}{2\pi}\right)$ com unidade de [Hz] hertz e o período, que representa o tempo de cada ciclo e é dado como $\tau = \left(\frac{1}{f}\right) = \left(\frac{2\pi}{\omega_n}\right)$.

De forma a se fazer uma introdução à abordagem bidimensional, é possível considerar o caso do comportamento dinâmico de uma plataforma. Atualmente, o desenvolvimento de plataformas *offshore* não são exclusividade da indústria do petróleo, e isto deve-se ao fato da constante busca por energias limpas.

Uma plataforma flutuante para geração de energia pode ser bem representada por um sistema com dois graus de liberdade. Considerando que este sistema irá oscilar em torno de um ponto "o" apresentando movimentos em ambos os eixos, ele irá formar uma trajetória parabólica. Este sistema pode ser representado como uma massa concentrada acoplada a um sistema de quatro molas fixas, com defasagem de 90° , como pode ser visto na Figura 9.

Figura 9 - Modelo simplificado de plataforma



Fonte: Autor (2018).

Por fim, de maneira simplificada, a equação que rege o movimento deste modelo de estrutura para pequenos ângulos é da forma:

$$m\ddot{x} + kx = 0 \quad (16)$$

$$m\ddot{y} + ky = 0 \quad (17)$$

2.3.2 Sistema Pendular

O sistema pendular é um antigo objeto de estudo entre os matemáticos e físicos, o qual teve seu estudo iniciado com Galileu Galilei (1564-1642), e até hoje é alvo de estudo devido tanto à facilidade de execução quanto à riqueza de informações geradas fruto de sua análise (RAO, 2008).

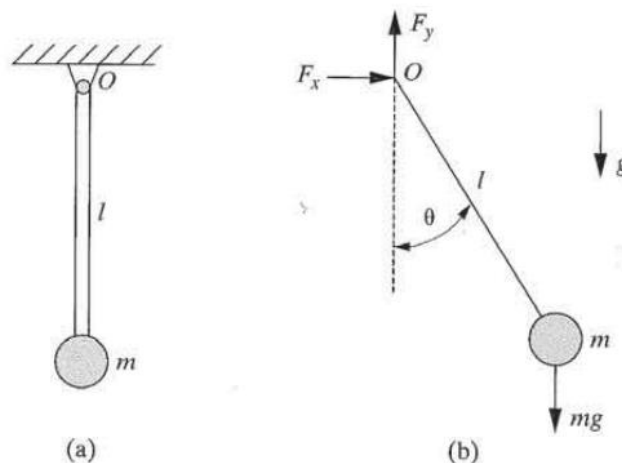
O sistema de um pêndulo simples é utilizado largamente para exemplificar o movimento harmônico simples, constituído por uma massa “ m ” concentrada e fixa numa ponta de um fio inextensível, de massa desprezível e de comprimento l , enquanto a outra extremidade é fixa. O sistema referencial considerado é no centro da massa concentrada “ m ”, quando esta se encontra na posição de equilíbrio estático, marcando o zero do sistema.

A modelagem matemática do pêndulo que é empregada nos cursos de física, onde desconsidera-se o efeito da resistência do ar e dos termos de segunda ordem, é uma abordagem linear que pode ser utilizada sem que haja perda substancial na qualidade da resposta. Para isto, o sistema é restringido para testes com pequenos ângulos de oscilação onde θ varia entre $0 \leq \theta \leq 10^\circ$, domínio no qual a consideração $\text{sen}\theta \cong \theta$ é válida (LOPES et. al, 2018). Desta forma, é possível analisar e comparar os dados obtidos mediante ao método proposto e confrontá-los com os obtidos analiticamente, evidenciando a qualidade de resposta.

2.3.2.1 Modelagem Matemática

Dando continuidade ao embasamento teórico, passamos à sua formulação matemática. As forças atuantes como a tração no fio e as componentes gravitacionais podem ser vistas na Figura 10.

Figura 10 – Representação do pêndulo.



Fonte: Inman (2007).

Uma das abordagens que resultam no equacionamento do movimento do pêndulo (Equação 18) pode ser feita por intermédio da segunda Lei de Newton:

$$mL\ddot{\theta} + mg\sin\theta = 0 \quad (18)$$

Nesta equação, m , l , t , g e θ são definidos como:

- l é o comprimento do fio em [m];
- m é a massa da esfera em [kg];
- g é a aceleração da gravidade em [m/s²];
- θ representa a posição horizontal da esfera em [rad];
- t é o tempo em [s].

Tendo em vista o estudo em pequenas oscilações e que a massa do sistema é concentrada no centro de gravidade da esfera é possível simplificar a Equação 18 chegando na Equação 19, afirmando que $\theta \cong \sin\theta$, o que implica num estudo de oscilações quase-horizontais:

$$\ddot{x} + \frac{gx}{L} = 0 \quad (19)$$

Desta forma, o período de oscilação harmônico pode ser expresso pela Equação 20 e a sua frequência natural pela Equação 21:

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{l}{g}} \quad (20)$$

Sabendo da relação entre o período τ e a frequência ω é $\tau = \frac{1}{\omega}$ temos $\omega = \sqrt{\frac{g}{l}}$.

3 Materiais e Método

Este trabalho tem como objetivo a elaboração e validação de uma ferramenta que realiza aferição do deslocamento e período de oscilação de objetos. Como citado no capítulo 2, são necessários experimentos para que seja realizada a validação da ferramenta.

Visto isto este capítulo tem como fim, apresentar os materiais utilizados no desenvolvimento dos experimentos e o método utilizado.

3.1 MATERIAIS

Neste capítulo serão abordados os materiais utilizados na concepção dos experimentos realizados durante a elaboração deste trabalho. Partindo do princípio aqui proposto de desenvolver um sistema de baixo custo sem a utilização de programas comerciais, após a conclusão deste item será apresentada um quadro com todos os custos envolvidos.

3.1.1 CÂMERA E SUPORTE

Sabendo que um dos maiores investimentos num sistema de monitoramento de movimentos comercial se dá por conta do alto valor da câmera, neste trabalho optou-se pela utilização de uma simples *webcam* para o desenvolvimento do sistema. O modelo utilizado foi da marca HP, modelo Hd-4110 com capacidade de filmar a 30 *frames* por segundo com resolução de 1080P (Figura 11). Para se ter uma base do custo desta câmera, foi realizada uma pesquisa que contou com mais de seis revendedores. A média de custo foi de R\$ 326,50. As demais informações e requerimentos de uso podem ser visualizadas no Anexo A.

Figura 11 – Webcam HP modelo Hd-4110



Fonte: HP Webcam (2018).

O suporte da câmera deve ser ajustável e firme fornecendo condições para que a filmagem não sofra interferência do seu movimento. Para isto, foi utilizado um pedestal de microfone simples, estrutura esta que apresenta rigidez, capacidade de movimentação e equilíbrio satisfatórios. Esta estrutura foi escolhida devido à simplicidade de uso e baixo custo quando comparada a um suporte profissional ou outro elaborado em madeira/aço. Após a consulta em mais de seis lugares, o preço encontrado para este equipamento é de R\$60,00.

A esfera utilizada nos ensaios foi elaborada com a utilização de duas porcas de aço para parafuso M6, que apresentam diâmetro e altura máximos de 13 e 6,1 milímetros respectivamente. Estas porcas foram unidas com o fio de nylon e cobertas por uma camada de massa de modelar. As porcas apresentaram custo de R\$0,20 cada e a massa de R\$20,00 por se tratar de uma massa de uso profissional.

A estrutura utilizada está apresentada na Figura 12. Para sua construção foi utilizado um tubo com comprimento de um metro, um joelho, e três juntas em forma de T. A fixação da câmera foi realizada com o suporte da própria câmera que envolve a estrutura de forma eficaz. Este suporte teve um custo total de R\$12,00.

Figura 12 – Suporte e câmera



Fonte: Autor (2018).

3.1.2 Calibração do sistema

3.1.2.1 Sistema de cores

Foi optado por realizar esta etapa manualmente devido à complexidade de elaborar uma função que selecionasse o melhor limiar automaticamente. Assim, definiu-se a cor do objeto distante da cor do fundo e realizou-se a conversão do modelo RGB para um limiar de HSV mínimo e máximo. A opção de um limiar com máximo e mínimo vem do fato de que uma sutil alteração na luminosidade interfere na definição da cor entendida pelo computador.

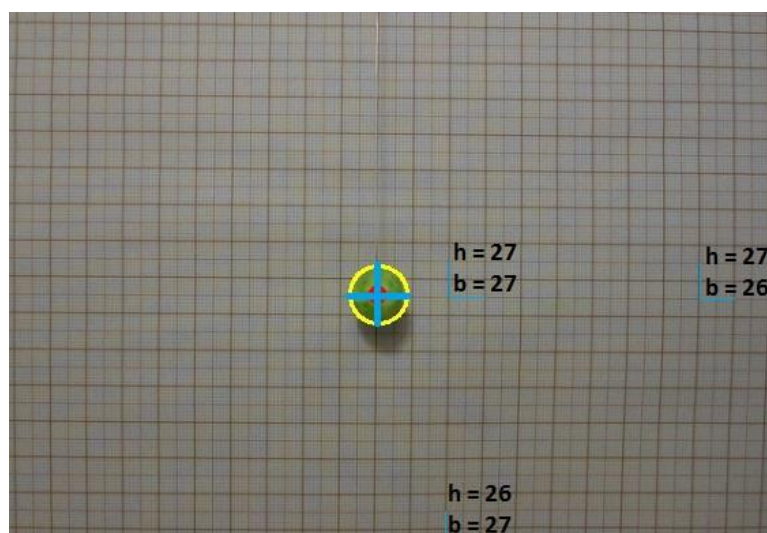
Para este caso em específico, como a região de interesse é em tons de verde e amarelo, foi optado pelo limiar: $(HSV)_{min} = (25,80,06)$ e $(HSV)_{max} = (68,255,255)$.

3.1.2.2 Sistema de coordenadas

A calibração do método proposto foi realizada através da trigonometria relacionando o sistema real e o sistema digital de coordenadas. Isto deve-se ao fato de que este trabalho tem como foco o monitoramento de pequenas oscilações no campo bidimensional. Para isto, foi definida a distância entre a câmera e o alvo, $0,28 \pm 0,005$ [m], de tal forma que as distorções efeito barril, onde as laterais do *frame* são alargadas, e o efeito almofada, em que os cantos sofrem as maiores distorções, pudessem ser descartadas.

Com o pêndulo na posição de equilíbrio estático alinhado com a câmera foi possível desenvolver uma relação entre o sistema real e o digital. Para isto, foram analisadas as dimensões do fundo milimetrado captado pela câmera e seu equivalente em *pixels*, como pode ser visto na Figura 13 com unidades expressas em *pixels*.

Figura 13 – Distorções da imagem capturada



Fonte: Autor (2018).

Como pode ser observado, as distorções não são relevantes para este estudo, tendo em vista que os testes executados tiveram um deslocamento máximo partindo do centro referencial de 40 milímetros. Assim o erro da ordem de $1 \text{ pixel} \pm 0,37$ milímetros pode ser tolerado.

Para realizar a conversão entre os sistemas digital x real partiu-se do princípio de que o alvo possui um diâmetro conhecido. Após as operações de limiarização e detecção de bordas, é possível descobrir a relação entre o diâmetro conhecido e sua equivalência em *pixels* na imagem. Tendo em mãos esta relação, bastou aplicá-la às coordenadas rastreadas para obter as posições em milímetros.

Após o processamento digital, pode-se realizar a análise do sinal obtido. Assim, foi possível encontrar: o máximo deslocamento, o deslocamento médio e o espectro de resposta para o movimento translacional.

3.1.3 Pêndulo simples

Em se tratando de um experimento relativamente simples de ser elaborado, este apresenta um custo irrisório se comparado ao da câmera abordado anteriormente. Para elaboração deste, foi utilizado um fio de nylon com espessura $t = 0,35$ [mm], com custo de R\$ 2,35.

A elaboração da esfera necessitou de duas arruelas de aço para parafuso M6 no centro, cobertas por uma camada de massa de modelar. Esta estrutura foi desenvolvida devido à dificuldade de encontrar-se uma esfera com diâmetro de 17 ± 2 [mm] e massa suficiente para esticar o fio de nylon, cerca de $0,004 \pm 0,0005$ [kg].

Para a utilização do fundo milimetrado convencional branco com listras beges claro para marcações de 1 [mm] e marrom para as de 10 [mm], o alvo foi confeccionado com massa de modelar na cor verde, visto que assim seu contorno é destacado face às operações de processamento de imagens descritas no capítulo 2 deste trabalho.

Na sequência o Quadro 1, apresenta a relação de custos envolvidos no desenvolvimento deste trabalho até aqui.

Quadro 1 – Custos envolvidos até no sistema pendular

Elemento	Custo [R\$]
Webcam HP modelo Hd-4110	326,50
Pedestal para microfone	60,00
Porcas	0,40
Estrutura de PVC	12,00
Fio de nylon	2,35

Custo total	401,25
--------------------	--------

Fonte: Autor (2018).

3.2 Método

Este trabalho visou desenvolver um sistema de rastreamento de alvo para aplicações no âmbito da Engenharia Naval. Para a validação do proposto, foi utilizado o método experimental, no qual os resultados obtidos através do PDI foram confrontados com um método, o método analítico. Este seguiu as equações descritas no capítulo 2, além dos resultados numéricos obtidos, as respostas do método analítico foram apresentadas de forma gráfica de forma que a análise dos resultados obtidos experimentalmente pudesse se tornar mais clara realizando a plotagem das trajetórias sobrepostas.

O procedimento experimental deu início a partir da filmagem 3 vezes consecutivas de cada condição por meio das coordenadas obtidas pelo PDI. Posteriormente, foram analisados os primeiros quatro ciclos completos para encontrar o período de oscilação e foi feita a análise da resposta do movimento harmônico observado. Logo após a análise do sinal obtido, realizou-se a comparação com os valores teóricos previamente calculados e os gráficos gerados numericamente seguindo as formulações matemáticas apresentadas no segundo capítulo.

Desta forma, foi possível compreender a aplicabilidade e restrições deste método, assim como possíveis melhorias a serem realizadas.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 EXPERIMENTOS COM O PÊNDULO SIMPLES

O experimento realizado utilizando o pêndulo simples neste trabalho foi elaborado com comprimento l de $1,445 \pm 0,005$, metros que pela Equação 21 apresentará um período médio de oscilação (teórico) de 2,416 segundos ou $0,4146 [Hz]$.

Para que as amplitudes máximas sejam obtidas realiza-se a decomposição dos catetos do triângulo retângulo formado pelo fio de comprimento l e a máxima amplitude em graus que a massa foi sujeitada.

A metodologia de análise de movimento para os 3 ensaios foi a mesma. Inicia-se com a calibração do sistema de coordenadas de maneira que o centro do foco da lente esteja alinhado com o centro do objeto em posição de equilíbrio estático, o eixo x está na horizontal, o eixo y na vertical e a coordenada z é tratada como a distância da câmera ao objeto. Antes do processamento do experimento é realizada a exclusão dos primeiros quatro segundos, devido à demora de resposta de ajuste e auto foco da câmera utilizada, o que impossibilita a detecção do alvo. Após este corte inicial são analisados apenas os primeiros quatro ciclos completos de oscilação de forma que a amplitude do movimento não sofra grande alteração decorrente de efeitos amortecedores como o do atrito com o ar. Os movimentos no eixo 'y' serão tratados de maneira sucinta ao final deste item pois não são alvo deste estudo.

Desta maneira, os ensaios foram realizados com três diferentes ângulos de condição inicial. O primeiro caso será descrito com maior nível de detalhes que desempenham para os demais casos.

4.1.1 Primeiro Ensaio

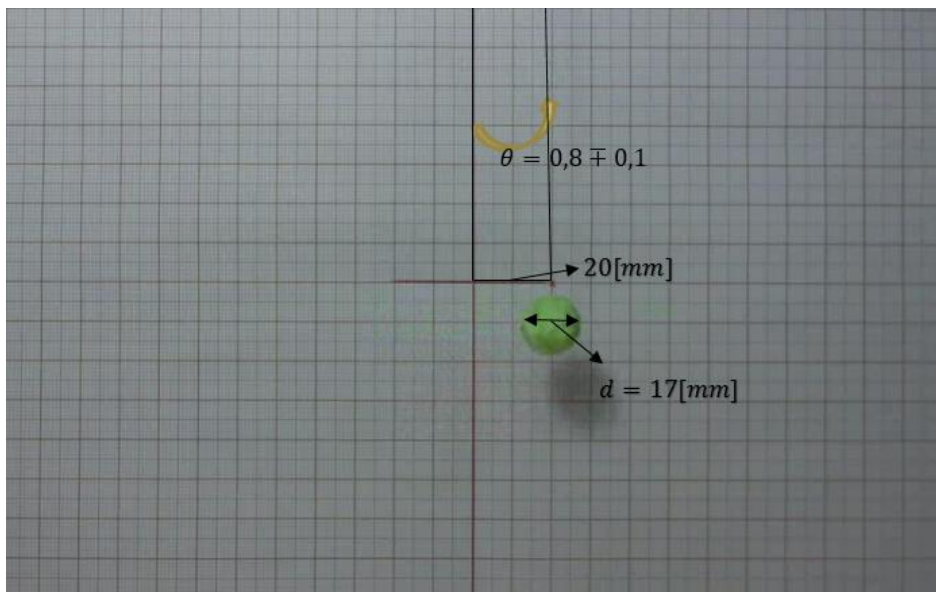
Para o primeiro experimento, foi imposto um deslocamento angular de $0,8^\circ \pm 0,1$ respeitando a hipótese de linearidade previamente abordada neste texto. Para conferência deste ângulo e do alinhamento do fundo, foi utilizado o nível digital presente no *smartphone* modelo Iphone 8, que apresenta a resolução de $\pm 0,1^\circ$. O alinhamento pode ser observado na Figura 14. Já a condição inicial deste teste pode está apresentada na Figura 15.

Figura 14 – Alinhamento do plano de fundo milimetrado



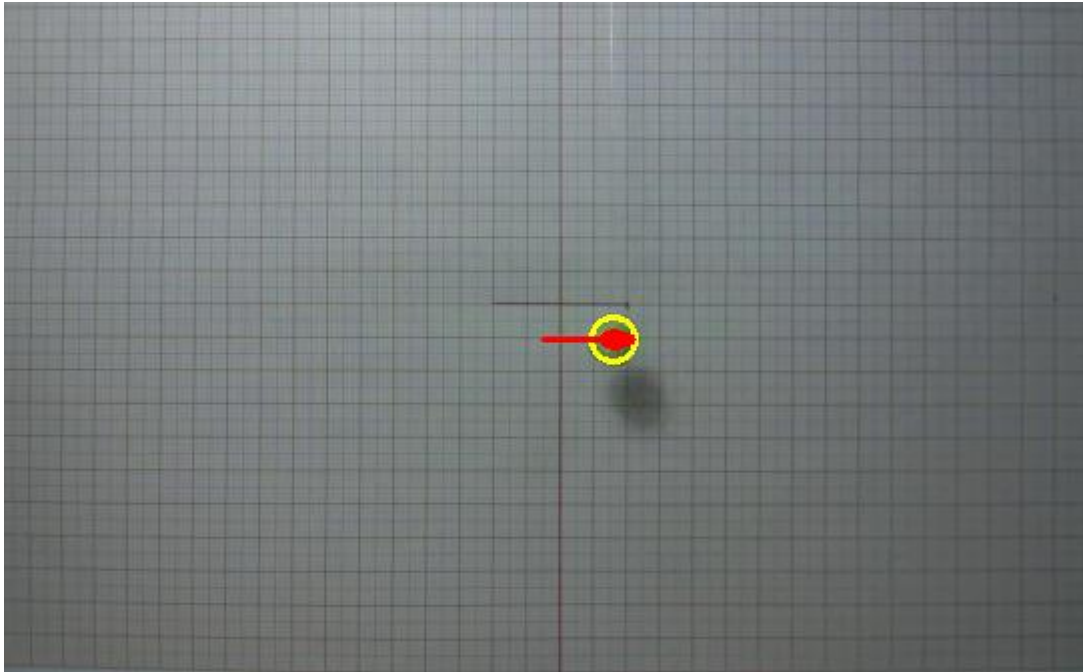
Fonte: Autor (2018).

Figura 15 – Pêndulo deslocado na condição inicial de 20 milímetros



Fonte: Autor (2018).

Figura 16 – *Frame* retirado durante o processamento do primeiro ensaio



Fonte: Autor (2018).

Como segunda forma de aferição do ângulo e posição de deslocamento inicial da massa marcou-se na folha milimetrada um ponto coincidente com o deslocamento máximo calculado analiticamente, 20 [mm]. Este ponto pode ser visto logo acima do alvo.

Este ensaio, assim como os demais, adiante, foi realizado e capturado três vezes. O erro das medições foi calculado de mesma forma, tendo sempre como base os valores teóricos previamente calculados. A Tabela 1 apresenta os resultados do primeiro ensaio.

Tabela 1 – Resultados do primeiro ensaio

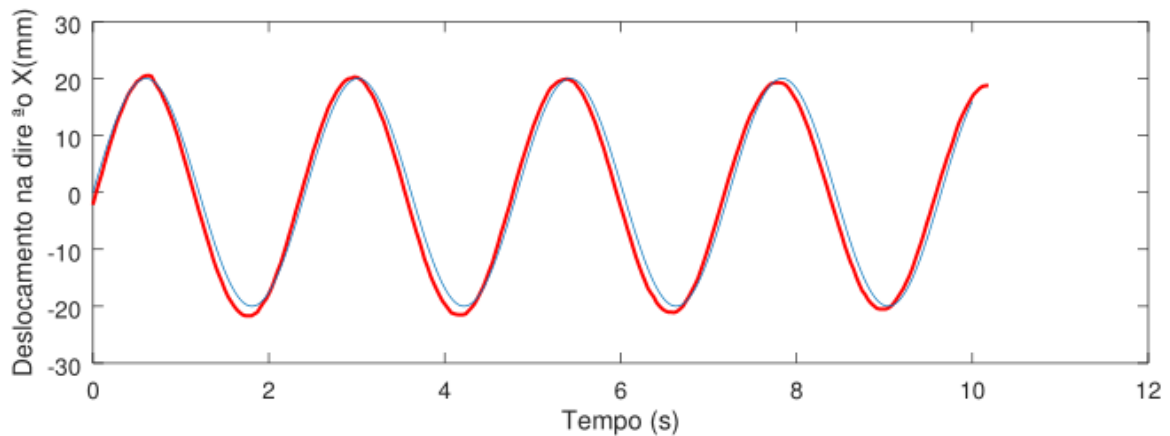
Ensaio 1: 20[mm]

Lançamento	Máximo deslocamento [mm]	Erro %	Frequência [Hz]	Erro %
01	21,63	7,5	0,4189	1,03
02	20,39	1,91	0,4218	1,73
03	19,56	2,2	0,4146	0
Média	20,52	2,53	0,4184	0,92

Fonte: Autor (2018).

Após a realização do primeiro teste, foi implementada uma rotina formada pelas equações analíticas apresentadas na revisão bibliográfica de tal sorte que a trajetória capturada pudesse ser sobreposta pelo MHS teórico do pêndulo. Conforme exposto na Figura 17, é possível verificar a proximidade do movimento teórico e movimento real do pêndulo simples para pequenos ângulos, assim como um erro acentuado nos vales da trajetória.

Figura 17 – Sobreposição da trajetória rastreada (vermelho) sobre a analítica (azul)



Fonte: Autor (2018).

Recapitulando a relação citada antes neste texto que ligava a Energia Potencial a energia Cinética, é possível encontrar a velocidade máxima alcançada. Considerando dois pontos onde: ponto 1: a massa se encontra na posição $\theta_{m\acute{a}ximo}$ como ponto onde E_p (Energia Potencial) é máxima e E_c (Energia Cinética) é zero (visto na Figura 15). E ponto 2: a massa se encontra na posição $\theta_{m\acute{i}nimo}$ quando E_p é zero e E_c é máxima, Figura (14).

A descrição matemática segue da forma:

$$E_{pmaxima} + E_{cm\acute{i}nima} = E_{pm\acute{i}nima} + E_{cm\acute{a}xima} \quad (22)$$

$$mgh + 0 = 0 + \frac{mv^2}{2} \quad (23)$$

$$v = \sqrt{\Delta y * g * 2} \quad (23)$$

Onde Δy diz respeito ao máximo deslocamento na vertical dado em metros g a aceleração da gravidade na unidade de metro por segundo ao quadrado. A distância Δy pode ser encontrada por trigonometria. Sendo $l = 1,445$ metros, a distância Δx do cateto oposto ao

ângulo $\theta_{m\acute{a}ximo}$ (condição de deslocamento inicial), visto na Equação 24. A Tabela 2 apresenta as velocidades obtidas no primeiro ensaio.

$$\Delta y = l - \text{sen} \left(\arccos \left(\frac{\Delta x}{l} \right) \right) l \quad (24)$$

Tabela 2 – Condições iniciais e velocidade máxima do primeiro ensaio

Ensaio 1: 20[mm]			
Lançamento	θ [°]	Δy 10³[m]	$v_{m\acute{a}xima}$ 10² [$\frac{m}{s}$]
Teórico	0,800	0,200	0,274
1	0,857	0,216	0,313
2	0,808	0,203	0,274
3	0,774	0,195	0,255
Média	0,809	0,203	0,279

Fonte: Autor (2018).

4.1.2 Segundo ensaio

Para o segundo ensaio, o ângulo e o deslocamento inicial foram de $1,18^\circ \pm 0,1$ e 30 milímetros respectivamente. Os procedimentos como: calibração, formas de comparação e cálculos foram realizados conforme o primeiro ensaio.

Tabela 3 – Resultados do segundo ensaio

Ensaio 2: 30[mm]				
Lançamento	Máximo	Erro %	Frequência [Hz]	Erro %
	deslocamento			
	[mm]			
01	29,06	3,1	0,4175	0,69
02	29,38	2,06	0,4175	0,69
03	28,72	4,2	0,42	1,28
Média	29,05	3,12	0,4183	0,88

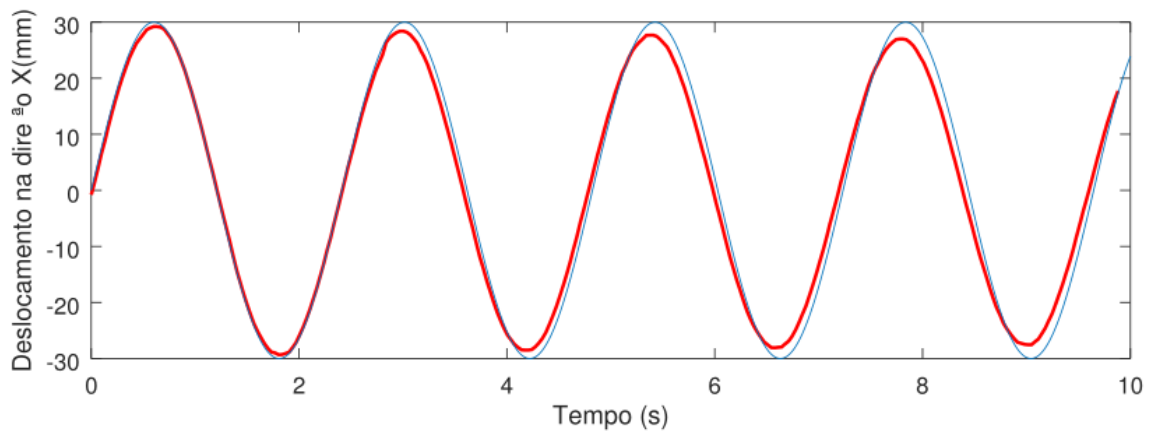
Fonte: Autor (2018).

Diferente do primeiro ensaio, a Figura 18 não apresenta uma maior discrepância nos vales da trajetória e sim uma melhor apresentação da redução de amplitude do movimento oscilatório. Esta redução se dá principalmente pelo atrito do alvo com o ar, termo este explicado

pela Equação 25 (ARNOLD et al. 2011). Onde as variáveis: F designa força, C_d é uma constante adimensional que depende do número de Reynolds(LANDAU; LIFSHITZ, 1987), ρ é a densidade do ar em kg/m^3 , v a velocidade do corpo. O estudo com maior ênfase no amortecimento causado pela resistência do ar pode ser encontrado em Arnold et al. (2011).

$$F = \frac{1}{2} C_d A \rho v^2 \quad (25)$$

Figura 18 – Sobreposição da trajetória rastreada (vermelho) sobre a analítica (azul)



Fonte: Autor (2018).

Seguindo a metodologia descrita ao longo item 6.1.1, o procedimento para encontrar a máxima velocidade teórica e as velocidades do ensaio, foram realizados para este ensaio e seus resultados apresentados na Tabela 4.

Tabela 4 – Condições iniciais e velocidade máxima do segundo ensaio

Ensaio 2: 30[mm]			
Lançamento	θ [°]	$\Delta y 10^3$ [m]	$v_{\text{máxima}} 10^2 \left[\frac{\text{m}}{\text{s}} \right]$
Teórico	0,800	0,312	0,60822
1	0,857	0,301	0,5886
2	0,808	0,290	0,56898
3	0,774	0,290	0,56898
Média	0,809	0,2975	0,00583695

Fonte: Autor (2018).

4.1.3 Terceiro ensaio

O último ensaio com o pêndulo simples foi realizado. Este teve o deslocamento inicial dado por duas vezes o do primeiro ensaio. O procedimento de análise foi realizado de maneira análoga aos anteriores, assim como seus resultados. Na Tabela 5 é possível analisar os deslocamentos máximos e teórico assim como as frequências de oscilação e erro voltado para cada um.

Tabela 5 – Resultados do terceiro ensaio

Ensaio 3: 40[mm]

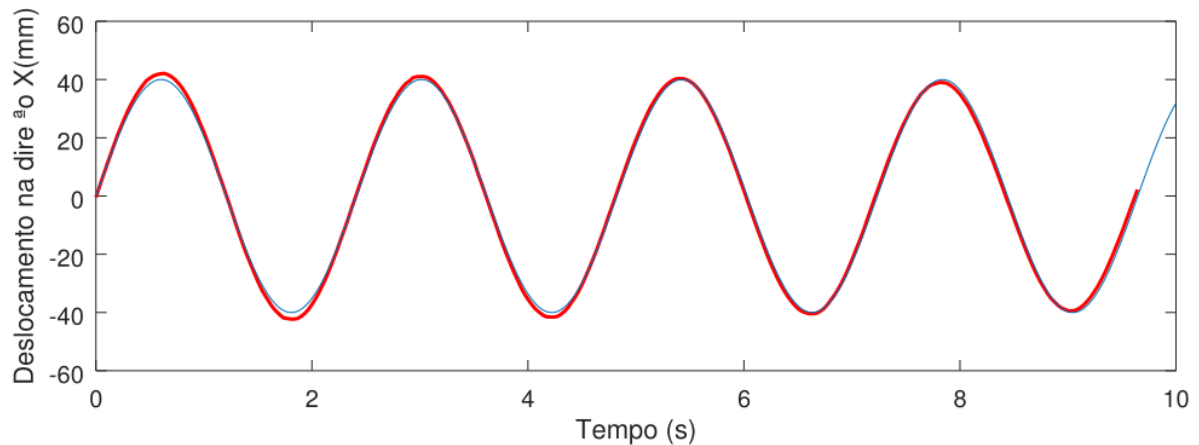
Lançamento	Máximo deslocamento [mm]	Erro %	Frequência [Hz]	Erro %
01	38,20	4,50	0,416	0,33
02	40,20	0,49	0,410	1,04
03	42,49	5,86	0,414	0,04
Média	40,29	0,71	0,4133	0,47

Fonte: Autor (2018).

Analisando o comportamento do movimento desempenhado pelo pêndulo neste ensaio com maior deslocamento é possível observar uma maior amplitude no primeiro ciclo, se comparada com a amplitude teórica. Este ponto exacerbado pode ter fonte, assim como nos demais experimentos, no erro associado a precisão da condição inicial, que mesmo utilizando modernos sensores presentes em smartphones apresentam acurácia de $\neq 0,1^\circ$.

Analisando o primeiro e o último ciclo é possível observar um decaimento na amplitude de oscilação mais aparente que nos outros ensaios. Isso pode ser explicado pela Equação 25, na qual é possível observar a influência da velocidade que interfere de maneira quadrática o amortecimento devido ao atrito do ar.

Figura 19 – Sobreposição da trajetória rastreada (vermelho) sobre a analítica (azul)



Fonte: Autor (2018).

Finalizando o terceiro ensaio, de maneira análoga serão apresentados os resultados obtidos para os ângulos e deslocamento iniciais assim como as velocidades máximas alcançadas durante o experimento.

Tabela 6 – Condições iniciais e velocidade máxima do terceiro ensaio.

Ensaio 3: 40[mm]			
Lançamento	θ [°]	$\Delta y 10^3$ [m]	$v_{\text{máxima}} 10^2$ [$\frac{\text{m}}{\text{s}}$]
Teórico	1,586	0,550	0,107
1	1,514	0,510	0,100
2	1,594	0,560	0,109
3	1,685	0,620	0,121
Média	1,594	0,560	0,109

Fonte: Autor (2018).

4.1.4 Sistema com 2GDL

Após concluir a análise dos ensaios com o pêndulo simples na condição de um grau de liberdade, foi elaborado um sistema com de dois graus de liberdade e teve auxílio do LAV (Laboratório de Vibrações e Acústica – UFSC Joinville).

Importante lembrar que esta estrutura esteve anteriormente exposta na SEPEX (Semana de Ensino Pesquisa e Extensão, 2018) na condição de dois graus de liberdade, com intuito de apresentar aos visitantes uma forma atrativa e interativa do estudo de vibrações em

um modelo de plataforma semissubmersível, Figura19. A interatividade ficou por conta das diferentes condições iniciais que eram imputadas no sistema enquanto a trajetória era apresentada na tela do computador.

Figura 20 – Sistema massa mola com 2GDL



Fonte: Autor e LVS (2018).

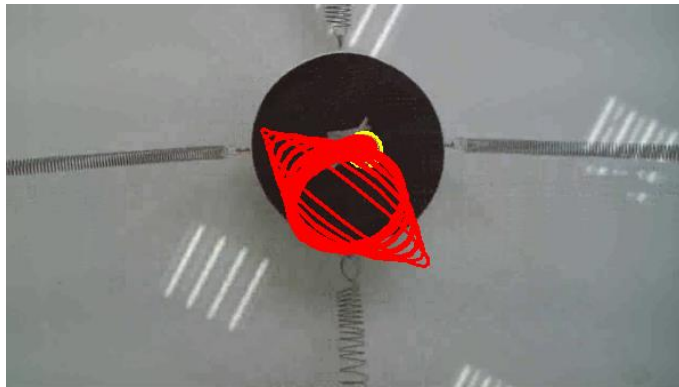
Os sistemas que apresentam 2GDL necessitam de duas coordenadas para que seu movimento seja descrito, ou seja, possuem duas equações não lineares, o que os tornam mais complexos de serem analisados quando comparados com 1GDL. De maneira breve, a modelagem matemática deste sistema pode ser rerepresentada:

$$m\ddot{x} + kx = 0 \quad (26)$$

$$m\ddot{y} + ky = 0 \quad (27)$$

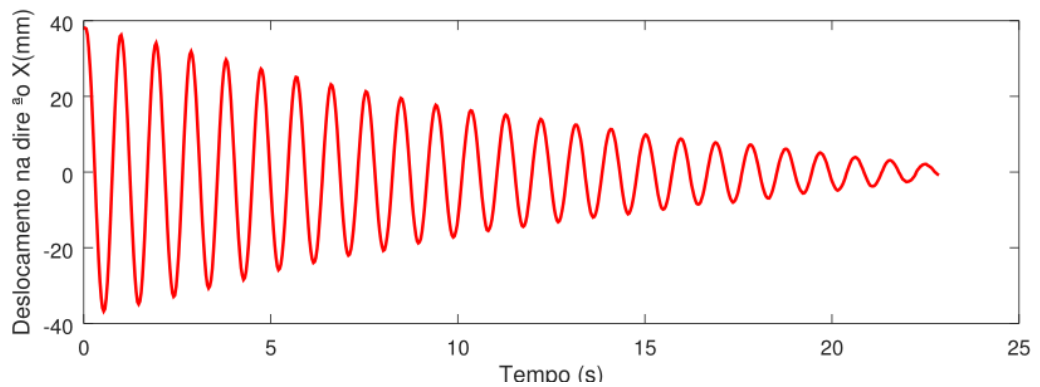
Onde as Equações 26 e 27, descrevem os movimentos no eixos x e y respectivamente. O rastreamento deste sistema realizada pela ferramenta aqui desenvolvida pode ser vista na Figura 21 onde é apresentado um *frame* durante sua execução. Nas Figuras 22 e 23 onde são apresentados os deslocamentos nas direções x e y. As frequências obtidas foram de 1,05 [Hz] para a direção x e de 1,007 [Hz] para a direção y.

Figura 21 – Rastreamento em execução



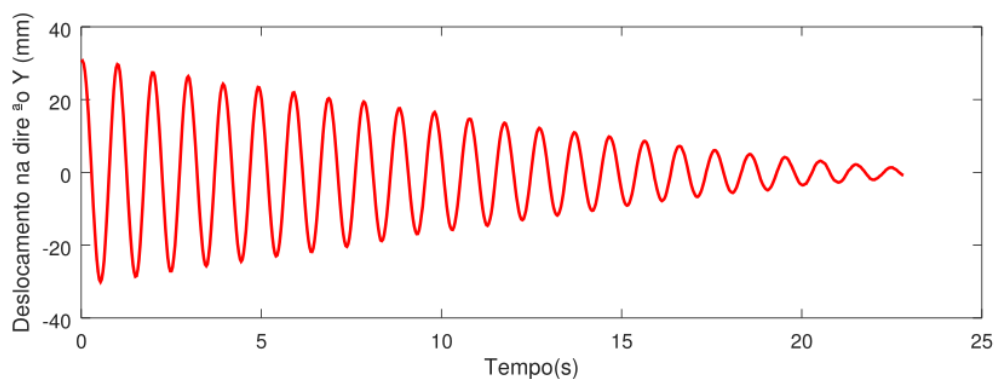
Fonte: Autor (2018).

Figura 22 – Amplitude de movimento no eixo x



Fonte: Autor (2018).

Figura 23 – Amplitude de movimento no eixo y



Fonte: Autor (2018).

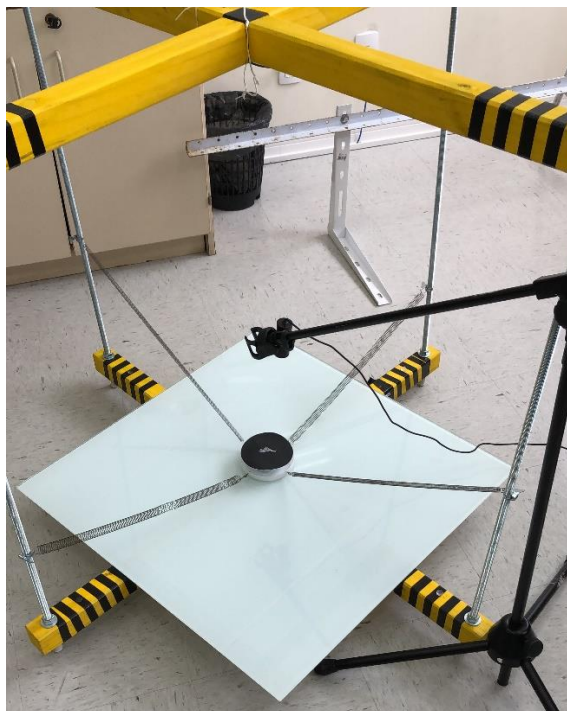
Através da ferramenta aqui desenvolvida foi possível observar e registrar o movimento oscilatório deste sistema. Como pode ser interpretado das Figuras 21 e 22, A discrepância entre as amplitudes nas direções x e y decorrem do sistema apresentar molas com maior rigidez na direção do eixo y e de menor rigidez no eixo x .

Este desbalanceamento do sistema é proposital, devido ao fato que os sistemas flutuantes em geral estão sujeitados a esforços que apresentam predominância em algumas direções, como correntes e ventos dominantes.

O procedimento de calibração foi o mesmo realizado para o experimento do pêndulo, apresentando diferença apenas na orientação da câmera, desta vez posicionada 90° em relação ao eixo z como pode ser visto na Figura 24. Os eixos foram alinhados com a utilização do nível apresentado anteriormente, conferindo uma precisão de $\pm 1 \text{ pixel}$ entre os sistemas coordenados.

Devido ao reflexo provindo do retângulo de vidro presente na base da estrutura do adicionado um contorno preto para realçar o alvo de forma que assim este não seja perdido ou confundido com reflexos aleatórios.

Figura 24 – Sistema de 2GDL calibrado



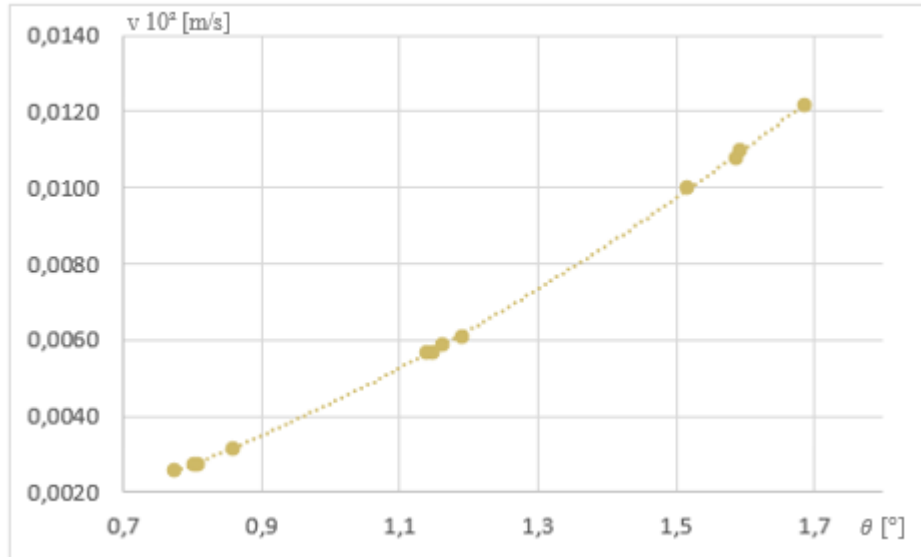
Fonte: Autor (2018).

4.2 ANÁLISE DOS ENSAIOS

Após a execução e análise individual dos ensaios com o pêndulo simples é possível tomar algumas conclusões diretas como: (1) a precisão da ferramenta desenvolvida para a análise da frequência do pêndulo simples é maior com o aumento do deslocamento inicial; (2) a velocidade, conforme esperado, aumenta com o acréscimo do deslocamento inicial de tal sorte que o período de oscilação se mantenha constante, visto na Figura 25; (3) fica explícito a validade das simplificações realizadas para pequenos ângulos, fazendo a consideração $\theta \cong \sin\theta$, visto que as oscilações desenhadas com os dados capturados pela ferramenta são quase coincidentes com a trajetória analítica; (4) é possível realizar análise da redução da amplitude de deslocamento; (6) o sistema de massa-mola analisado foi suficiente para demonstrar a capacidade de captura do movimento em dois graus de liberdade pelo sistema; (7) considerando as fontes de erro durante a elaboração dos ensaios, os resultados de precisão média de 2,12% são considerados aceitáveis para esta ferramenta; (8) ao longo do desenvolvimento deste trabalho foram realizadas diversas alterações no código de tal maneira que este agora é capaz de realizar o processamento dos dados sem atraso para uma frequência de captura de 30 *frames* por segundo; (9) a capacidade da ferramenta de aferir a frequência de vibração dos sistemas é

atrelada diretamente com a taxa de aquisição da câmera utilizada, neste caso para taxa de 30 *frames* por segundo, segundo o teorema de Nyquist, a máxima frequência do movimento é de 15 [Hz].

Figura 25 – Relação velocidade \times ângulo inicial



Fonte: Autor (2018).

O Quadro 1 apresenta, de maneira condensada, as principais fontes de erro envolvidas na execução dos experimentos.

Quadro 2 – Fontes de erro

Fontes de Erro	
Condição Inicial	∓ 2 [mm]
Diâmetro da esfera	∓ 2 [mm]
Comprimento do fio	∓ 5 [mm]
Calibração	$\mp 2,5$ [mm]

Fonte: Autor (2018).

5 CONCLUSÕES E PERSPECTIVAS

O desenvolvimento deste trabalho visou a elaboração de uma ferramenta para efetuar o rastreamento de alvo, assim como utilizar da metodologia experimental para efetuar a validação da ferramenta. Para que isso pudesse ser feito, fez-se necessário desenvolver um conhecimento a respeito do PDI, pois sem alguns conceitos relacionados ao processamento digital de imagens, tal tarefa não poderia ser concluída.

Ao longo deste trabalho foi possível perceber a eficiência da ferramenta quanto a análise da frequência, onde foi calculado um erro médio de 0,75% e no rastreo de movimentos onde este erro foi de 2,12%, que representa um erro de 2 milímetros. Por se tratar de uma primeira versão, este erro pode ser considerado aceitável.

Foi possível perceber a aplicabilidade desta ferramenta, assim como as oportunidades de realizar melhorias que podem ser divididas em: (1) realizar um maior número de testes variando a dimensão do alvo para que seja determinado seu tamanho ótimo; (2) elaborar numericamente a análise do pêndulo considerando as não linearidades, assim como o ensaio de 2GDL para realizar a validação desta ferramenta no campo bidimensional; (3) implementar os métodos de calibração abordados por Dias (2015), e, desta forma, ampliar a capacidade de monitoramento para as três dimensões adicionando uma ou n câmeras.

REFERÊNCIAS

ALVES, D. R. **Avaliação dos Modelos de Cores RGB e HSV na segmentação de Curvas de Nível em Cartas Topográficas Coloridas**. 2010. 67 p. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Elétrica, Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2010.

ALVES, D. R. **Avaliação dos Modelos de Cores RGB e HSV na segmentação de Curvas de Nível em Cartas Topográficas Coloridas**. 2010. 67 p. Dissertação (Mestrado) - Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais, Belo Horizonte, Minas Gerais, 2010.

AMARANTE, R. M. **Estudo da estática e dinâmica de linhas, sob configuração de catenária, através da identificação geométrica, processamento e análise de imagens digitais**. 2010. 207 p. Dissertação de Mestrado – Programa de Pós-Graduação em Engenharia, Escola Politécnica, Universidade de São Paulo. São Paulo, 2010.

ARNOLD, F.J. et al. **Estudo do amortecimento do pêndulo simples: uma proposta para aplicação em laboratório de ensino**. Revista Brasileira de Ensino de Física, v. 33, n 4, 4311, 2011.

BHATIA, P. K. **Computer Graphics**. 2. ed. Nova Deli: International Pvt. Ltd, 2008. 400 p.

BRAGA, C. N. **Como funcionam os sensores de imagem CCD**. 2014 Disponível em: <<http://www.newtoncbraga.com.br/index.php/como-funciona/6912-como-funcionam-os-sensores-de-imagem-ccd-art1038>>. Acesso em: 12 set. 2018.

DIAS, L. V. A. **Estudo e análise de diferentes métodos de calibração de câmeras**. 2015. 73p. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Ciência da Computação, Departamento Acadêmico de Informática, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Ponta Grossa, 2015

FONSECA, M. M. **Arte Naval**. 2. ed. Rio de Janeiro: Marinha do Brasil , 1960.

FILHO, O. M.; NETO, H. V. **Processamento digital de imagens**. [S.l.]: Brasport, 1999.

GARRET, F. Conheça Chronos: câmera de alta velocidade, compacta e com preço acessível. **Techtudo**. Disponível em: <<http://www.techtudo.com.br/noticias/noticia/2016/11/conheca-chronos-camera-de-alta-velocidade-compacta-e-com-preco-acessivel.html>>. Acesso em: 11 jul. 2018.

GONZALES, R.C.; WOODS. R.E. **Digital image processing**. Prentice Hall, 3ª edição, New Jersey, 2003.

GORETTI, K. **Estruturas APS Resistentes à Radiação para Aplicações Espaciais**. 2006. 118p.Dissertação(Mestrado) – Curso de pós-graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro,2006.

HP WebCam. Manual. Disponível em:

<<http://h10032.www1.hp.com/ctg/Manual/c02635979>>. Acesso em: 3 nov. 2018.

INMAN, D. J. **Engineering Vibration**. 3. ed. New Jersey: Pearson Prentice Hall, 2007.

JESUS, E. O.; COSTA JR, R. **A Utilização de Filtros Gaussianos na Análise de Imagens Digitais**. Proceeding Series of the Brazilian Society of Applied and Computational Mathematics, v. 3, n 1, 2015.

LANDAU, L.D.; LIFSHITZ, E.M. **Fluid Mechanics**. 2. Ed. Oxford: Pergamon Press, 1987

LOPES, F.S.; SUAVE, R.N.; NOGUEIRA, J.A. **Uma revisão das aproximações lineares para grandes amplitudes de oscilações do período de um pêndulo simples**. Revista Brasileira de Ensino de Física, v. 40, n 3, e3313, 2018.

RAO, S. S. **Vibrações Mecânicas**. São Paulo, SP: Pearson Prentice Hall, 2008.

RUSS, J. C. **The Image Processing Handbook**. 5. ed. [S.l.]: CRC Handbook Published in Cooperation with IEEE Press, 2007. 817 p.

SOLOMON, C.; BRECKON, T. **Fundamentals of Digital Image Processing - High Resolution Book Figures**. 2015.

SOUZA, J.S.; CARDOZA, J.A.S. **Sensores de Imagem Digitais CCD E CMOS**. In: Congresso Norte Nordeste de Pesquisa e Inovação, VII, 2009, Anais. Tocantins: Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia, 2012.

TSAI, R. Y. **A versatile camera calibration technique for high-accuracy 3d machine vision metrology using off-the shelf tv cameras and lenses**. Journal of Robotics and Automation, v. RA-3, n. 4, p. 323-344, 1987.

ZHUANG, H.; ROTH, Z. S. **Camera-aided robot calibration**. USA: CRC Press, 1996.

APENDICE A – Ferramenta de Rastreo

```

#
#Rastreamento com video pos processado
#Alexandre Martins Giralddi
#Engenharia Naval - UFSC - Joinville - 2018-2
#Python 2.7
#LAV Laboratório de de Vibrações e Acustica
#https://www.linkedin.com/in/alexandre-giralddi-71a274b0/
#
from imutils import contours
from imutils import perspective
from collections import deque
from imutils.video import VideoStream
import numpy as np
import argparse
import cv2
import imutils
import time
import serial # carrega a biblioteca Serial para
                # comunicações série
import numpy # carrega a biblioteca numpy
import matplotlib.pyplot as plt #carrega a
                                #biblioteca pyplot
import matplotlib.gridspec as gridspec #carrega a
                                        # biblioteca gridspec

from array import array #carrega a biblioteca
                        # array

plt.axis([0, 200, -200, 300])

i = 0          # Inicializando o contador

# construct the argument parse and parse the arguments
ap = argparse.ArgumentParser()
ap.add_argument("-v", "--video",
                help="20mm03.avi")
ap.add_argument("-b", "--buffer", type=int, default=50, # Por padrao; 50
                help="max buffer size") # Define o tamanho do Buffer
                                        # (quantidade de centros mostrados)
                                        # alterando o default = ...

args = vars(ap.parse_args())
centrosxy = open('Nomei_o_arquivo_de_texto.txt', 'w') # Abre o documento em que os
                                                        # centros serao escritos
dd = 1.7 # diametro do alvo utilizado para realizar a trigonometria

posicoesx = [] # Inicializando o vetor de posicoes x que sera salvo em txt
posicoesy = [] # Inicializando o vetor de posicoes y que sera salvo em txt
centros1 = [] # Inicializando o vetor de posicoes x que recebera os valores x
              # momentaneamente como inteiro

raios = []
centros2 = [] # Inicializando o vetor de posicoes y que recebera os valores y
              # momentaneamente como inteiro

# Definicao do range de cores em que o algoritmo fara
# a busca em *Formato hsv. Para alterar a cor do alvo basta
# redefinir o range de cores filtradas
greenLower = (25, 80, 5)
greenUpper = (70, 250, 250)

# Inicializacao dos centros que serao mostrados
pts = deque(maxlen=args["buffer"]) # deque e um vetor que armazena
                                    # uma quantida de dados definida
                                    # excluindo os anteriores

#Abre o video desejado (salvo na mesma pasta do codigo)
cap = cv2.VideoCapture('20mm03.avi') # Necessário recolocar o titulo do video

```



```

while( cap.isOpened() ) : # Enquanto estiver recebendo:

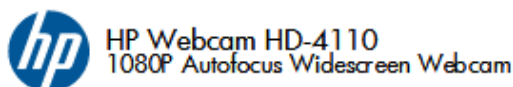
    ret,frame = cap.read()

    if frame is None:      # Pausa quando acaba o video
        break
    frame = imutils.resize(frame, width=600)# Redimensionamento da imagem
    # buscando menor custo de processamento
    blurred = cv2.GaussianBlur(frame, (11, 11), 0)# Aplicacao do filtro Gaussiano
    hsv = cv2.cvtColor(blurred, cv2.COLOR_BGR2HSV)# Mudanca entre modelos de cor
    mask = cv2.inRange(hsv, greenLower, greenUpper)# Filtra a cor de interesse
    mask = cv2.erode(mask, None, iterations=2)# Afina os perfis
    mask = cv2.dilate(mask, None, iterations=2)# Expande os perfis
    cnts = cv2.findContours(mask.copy(), cv2.RETR_EXTERNAL, # Deteccao de bordas
        cv2.CHAIN_APPROX_SIMPLE)
    cnts = cnts[0] if imutils.is_cv2() else cnts[1]
    center = None
    k = cv2.waitKey(10) # Inicializa comando
    if len(cnts) > 0:
        # Encontro o maior contorno e calculo o menor circulo que abranja
        # esta area e seu centroide
        c = max(cnts, key=cv2.contourArea)
        ((x, y), radius) = cv2.minEnclosingCircle(c)
        M = cv2.moments(c)
        center = (int(M["m10"] / M["m00"]), int(M["m01"] / M["m00"]))
        centros1=(M["m10"] / M["m00"])
        centros2=(M["m01"] / M["m00"])
        posicoesx.append(centros1)
        posicoesy.append(centros2)
        raios.append(radius)
        centrosxy.write('%s %s\n' %(centros1/dd,centros2/dd))
        i+=1

    # Se o raio encontrado for maior que 10 (pixels) e dada continuidade
    if radius > 10:
        # Desenhando o circulo e seu centroide
        # Atualiza o vetor pts utilizando appendleft
        # para que somente os ultimos centros sejam
        # apresentados na tela
        # Assim so a quantidade de centros definida
        # anteriormente no Buffer e mosrada.
        cv2.circle(frame, (int(x), int(y)), int(radius),(0, 255, 255), 2)
        cv2.circle(frame, center, 5, (0, 0, 255), -1)
        pts.appendleft(center)
        for i in range(1, len(pts)):
            # Se os pontos forem nulos ( sem alvo) ignoramos
            # Se o alvo nao foi perdido e desenhada uma linha
            # que liga as posicoes anteriores as mais recentes
            thickness = int(np.sqrt(args["buffer"] / float(i + 1)) * 2.5)
            cv2.line(frame, pts[i - 1], pts[i], (255, 0, 0), thickness)#Cor do CG
            cv2.imshow("Rastreamento",frame)
centrosxy.close() # Fechando o arquivo 'centrosxy.txt' onde os centros foram salvos

```

ANEXO A - Especificações técnicas da câmera utilizada



TECHNICAL SPECIFICATIONS	
VIDEO RESOLUTION	• Full 1080P (1920x1080)
COLOR DEPTH	• 24 Bit True Color
FOCUS METHOD	• CMOS sensor with autofocus
USB CERTIFICATION	• USB 2.0 high-speed certified
VIDEO RESOLUTION SUPPORT	• Live video resolutions supported at up to 30 frames per second: - 352 x 288 - 424 x 240 - 432 x 240 - 640 x 360 - 640 x 480 - 800 x 448 - 800 x 600 - 960 x 544 - 960 x 720 - 1280 x 720 • Video record at up to 1920 x 1080
STILL PICTURE RESOLUTION	• Up to 13.0 Megapixels by software interpolation ¹
UVC (UNIVERSAL VIDEO CLASS)	• Supported
FACE-TRACKING	• Yes
TILT	• 60°, up to 30° down and 30° up
PAN	• 360°, up to 180° left, up to 180° right
MICROPHONE	• Directional
DIGITAL ZOOM	• Settings up to 5X
QUICK LAUNCH BUTTONS	• HP Instant Video • HP Instant Image Capture • HP Instant Chat Button
FRONT LED (ON/OFF)	• Yes
CABLE LENGTH	• 6 Feet

SPECIFICATIONS	
SYSTEM REQUIREMENTS	• Intel Dual Core with 1.6 GHz or AMD Athlon 64 4000+ equivalent processor or faster and 1GB RAM (recommended Intel® Core i5 2.53 GHz and 2GB RAM for 1080P video recording) • Windows® 7/ Vista® / XP with SP2 (32 or 64 bit) • 230 MB free hard drive space for software • CD-ROM drive • USB 2.0 port
COMPATIBILITY	• Compatible across most notebook and desktop platforms
WHAT'S IN THE BOX	• Webcam • CD with driver, software and documentation: -ArcSoft Webcam Companion® 3 -Magic-i™ Visual Effects 2 -ArcSoft ShowBiz™ • Quick set-up guide • Limited Warranty document
WARRANTY AND SUPPORT	• One-year, worldwide parts-and-labor limited warranty • 24x7 HP technical phone support during warranty period

ADDITIONAL INFORMATION	
HP PRODUCT NUMBER	• XA407AAABAA
UPC CODE	• 885631367537
TARIFF NUMBER	• 8525803050
ITF 14 INNER CARTON	• 10885631367534
ITF 14 MASTER CARTON	• 20885631367531
COUNTRY OF ORIGIN	• China
MASTER CARTON QUANTITY	• 12
MASTER CARTON DIMENSIONS	• 21.93" x 13.27" x 8.12"
MASTER CARTON WEIGHT	• 11.76 lbs.
PACKAGED PRODUCT DIMENSIONS	• 6.10" x 6.30" x 3.35"
UNPACKAGED PRODUCT DIMENSIONS	• 2.16" x 2.75" x 2.16"
PACKAGED PRODUCT WEIGHT	• 0.65 lbs
UNPACKAGED PRODUCT WEIGHT	• 0.25 lbs