

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ  
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE ENGENHARIA MECÂNICA  
CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA

CRYSTIAN ANDREI MARIOTT  
NATANAEL SILVEIRA JUNIOR

**ANÁLISE DE VIBRAÇÕES POR PROCESSAMENTO DE IMAGEM**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

PATO BRANCO  
2015

CRYSTIAN ANDREI MARIOTT  
NATANAEL SILVEIRA JUNIOR

## **ANÁLISE DE VIBRAÇÕES POR PROCESSAMENTO DE IMAGEM**

Trabalho de Conclusão de Curso de graduação, apresentado à disciplina de Trabalho de Diplomação, do Curso Superior de Engenharia Mecânica do Departamento Acadêmico de Engenharia Mecânica – DAELT – da Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR, como requisito parcial para obtenção do título de Engenheiro Mecânica.

Orientador: Prof. Dr. Paulo Rogério Novak

Co-orientador: Prof. Dr. Gilson Adamczuk Oliveira

PATO BRANCO

2015

## **AGRADECIMENTOS**

Durante o desenvolvimento desta etapa de nossa graduação, não podemos deixar de nos lembrar de todos que nos apoiaram de alguma forma nesse longo período. Gostaríamos de agradecer a Deus, aos nossos familiares e amigos, pelo apoio e amizade que se demonstram de imensa importância a cada nova etapa de nossas vidas.

Agradecemos a todos os professores que tanto em sala de aula como fora dela nos ensinaram além dos conhecimentos técnicos necessários, mas também como sermos éticos e profissionais durante o decorrer de nossas vidas.

Agradecemos aos professores orientadores pela colaboração, apoio e dedicação ao longo do desenvolvimento deste, e dos demais projetos desenvolvidos nesta etapa.

A UTFPR pelo acolhimento desde o início de nossa caminhada, por fornecer estrutura e profissionais capacitados e dedicados aos quais sempre contaremos como apoio, não nos esquecendo ainda do apoio financeiro e da disponibilização dos laboratórios e da estrutura adequados a nossa formação.

Ainda somos gratos aos professores avaliadores, os quais disponibilizaram tempo e conhecimento para avaliar e acrescentar conhecimento ao projeto desenvolvido.

## RESUMO

MARIOTT, Crystian A.; SILVEIRA, Natanael Jr. Análise de vibrações por processamento de imagem. 2015. 93 f. Trabalho de Conclusão de Curso – Engenharia Mecânica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Pato Branco, 2015.

Neste trabalho apresenta-se o desenvolvimento de um novo método de análise de vibrações mecânicas, atuando de forma diferente aos métodos já desenvolvidos e amplamente difundidos entre as indústrias e laboratórios. O desenvolvimento desta metodologia tem como objetivo facilitar o processo de análise de vibrações, cujo grau de dificuldade de realização é alto. Assim como desenvolver um sistema de medida que seja de baixo custo comparado aos atuais sistemas de medidas de precisão. A análise de vibrações por processamento de imagem apresenta erros de leitura dentro dos mesmos níveis dos sensores de contato, mesmo quando submetida há condições adversas. Podendo atuar em áreas onde o sensor de contato é impossibilitado ou inviável, garantindo assim, um ensaio rápido, de baixo custo e com confiabilidade.

**Palavras-chave:** Análise de Vibrações. Processamento de Imagem. Método de Análise de Vibrações.

## **ABSTRACT**

MARIOTT, Crystian A.; SILVEIRA, Natanael Jr. Vibrations Analysis by Image Processing. 2015. 93 f. Trabalho de Conclusão de Curso – Engenharia Mecânica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Pato Branco, 2015.

This paper presents the development of a new method of analysis of mechanical vibrations, operating in a different way of the methods already developed and widely spread among industries and laboratories. The development of this methodology has the objective of facilitating a vibration analysis process which difficulty level of achievement is high. Also looks forward to develop a low cost system of measurement compared with the current precision measurement systems. The vibration analysis by image processing presented errors within the same level of contact sensors, even when subjected to adverse conditions. It can operate in areas where the contact sensors are unable or impracticable, thus ensuring a quick, low cost and reliable test.

**Keywords:** Vibration Analysis. Image processing. Method of analysis of mechanical vibrations.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Resposta de um instrumento de medição de vibração. ....	21
Figura 2 - Acelerômetros. ....	22
Figura 3 - Deformação Radial. ....	27
Figura 4 - Deformação Tangencial. ....	27
Figura 5 - Distância focal. ....	28
Figura 6 - Geometria Simples (Ponto mínimo) ....	33
Figura 7 - Geometria Complexa (Ponto máximo) ....	33
Figura 8 - Geometria Complexa e tamanhos correspondentes em milímetros. ....	35
Figura 9 - Geometria Simples e tamanhos correspondentes em milímetros ....	35
Figura 10 - Metodologia utilizada na determinação das distancias. ....	36
Figura 11 - Determinação da variação angular ....	37
Figura 12 - Variação frequência da lâmpada estroboscópica ....	39
Figura 13- Gabarito ....	46
Figura 14 - Diagrama de Posicionamento ....	47
Figura 15 - Especificações Técnicas Canon A480. ....	48
Figura 16 - Acelerômetro ENDEVCO 256-100 (dimensões em milímetros). ....	49
Figura 17- Características dinâmicas do acelerômetro. ....	50
Figura 18 - Amplitude de resposta. ....	50
Figura 19 - Temperatura de resposta. ....	50
Figura 20- Diagrama dB4. ....	51
Figura 21 - Quadro de dados técnicos Microventilador Q80A3 (6P). ....	55
Figura 22 - Dimensões Microventilador Q80A3 (6P). ....	55
Figura 23 - Bancada de Experimento. ....	57
Figura 24 - Diagrama de posicionamento do experimento. ....	58
Figura 25 - Média de erros de Frequência ....	90
Figura 26 - Média de erros de amplitude em relação aos Blocos. ....	92
Figura 27 - Média de erros de Erro de Amplitude de Movimento ....	93
Figura 28 - Distribuição dos erros de frequência. ....	96
Figura 29 - Distribuição dos erros de amplitude ....	97

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Pontos máximos e mínimos dos parâmetros. ....	41
Tabela 2 - Sequência de testes para o primeiro bloco .....	42
Tabela 3- Sequência de testes para o segundo bloco .....	43
Tabela 4 - Sequência de testes para o terceiro bloco. ....	44
Tabela 5 - Sequência de testes para o quarto bloco. ....	45
Tabela 6 - Configurações do Analisador de Vibração NK100. ....	53
Tabela 7- Dados técnicos DF51-322. ....	54
Tabela 8 - Dados de funcionamento Microventilador Q80A3 (6P). ....	55
Tabela 9 - Resultados Frequência Bloco 1 .....	67
Tabela 10 - Resultados Frequência Bloco 2.....	68
Tabela 11 - Resultados Frequência Bloco 3.....	70
Tabela 12 - Resultados Frequência Bloco 4.....	71
Tabela 13 - Testes com erro superior a 5% .....	72
Tabela 14 - Erro inferior a 1% .....	73
Tabela 15 - Resultado Amplitude Bloco 1 .....	78
Tabela 16 - Resultado Amplitude Bloco 2 .....	79
Tabela 17 - Resultado Amplitude Bloco 3 .....	81
Tabela 18 - Resultado Amplitude Bloco 4 .....	82
Tabela 19 - Erro máximo e mínimo para amplitude.....	83
Tabela 20 - Erro apresentados superiores a 10%. ....	85
Tabela 21 - Erro compreendendo intervalo entre 5% e 10%. ....	86
Tabela 22 - Resultados de amplitude com erro inferior a 1%. ....	88
Tabela 23 - Proporção baseada no erro quadrático médio residual. ....	89
Tabela 24 - Proporção baseada no erro quadrático médio residual. ....	91
Tabela 25 - Dados estatísticos resumidos. ....	94
Tabela 26 - Intervalo de confiança de 95,0% .....	95
Tabela 27 – Correlações .....	96

## SUMÁRIO

<b>SUMÁRIO</b> .....	<b>6</b>
<b>1. INTRODUÇÃO</b> .....	<b>9</b>
<b>2. DELIMITAÇÃO DO TEMA</b> .....	<b>11</b>
<b>3. PROBLEMAS E PREMISSAS</b> .....	<b>12</b>
<b>4. OBJETIVO</b> .....	<b>13</b>
4.1. OBJETIVO GERAL .....	13
4.2. OBJETIVO ESPECÍFICO .....	13
<b>5. JUSTIFICATIVA</b> .....	<b>14</b>
<b>6. REFERENCIAL TEÓRICO</b> .....	<b>15</b>
6.1. CONCEITOS BÁSICOS DE VIBRAÇÕES .....	15
6.2. PROCEDIMENTO PARA ANÁLISE DE VIBRAÇÕES .....	16
6.2.1. Modelagem Matemática .....	16
6.2.2. Derivação das Equações Governantes .....	17
6.2.3. Solução das Equações Governantes .....	17
6.2.4. Interpretação dos Resultados.....	17
6.3. MEDIÇÃO VIBRAÇÃO .....	18
6.3.1. Transdutor .....	18
6.3.1.1. Transdutor de resistência variável.....	18
6.3.1.2. Transdutor piezolétrico .....	19
6.3.1.3. Transdutor transformador diferencial linear.....	19
6.3.2. Sensores De Vibrações.....	20
6.3.2.1. Transdutor de deslocamento.....	20
6.3.2.2. Acelerômetro .....	21
6.3.2.3. Transdutor de velocidade .....	22
6.3.3. Instrumento de Medição de Frequência .....	22
6.3.3.1. Tacômetro de Fullarton .....	23
6.3.3.2. Tacômetro de Frahm .....	23
6.3.3.3. Estroboscópio.....	23
6.3.4. Excitadores de Vibrações.....	24
6.3.4.1. Excitadores mecânicos.....	24
6.3.4.2. Excitador eletrodinâmico ou eletromagnético .....	24
6.4. CONCEITOS BÁSICOS DE IMAGEM DIGITAL.....	25



6.4.1. Estrutura de uma câmera digital.....	25
6.4.1.1. Lente .....	26
6.4.1.2. Distância focal .....	27
6.4.1.3. Ângulo de visão .....	29
6.5. TAMANHO DA IMAGEM.....	29
6.6. PLANEJAMENTO DE EXPERIMENTO COM VÁRIOS FATORES .....	29
6.6.1. Experimentos Fatoriais.....	30
<b>7. PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS.....</b>	<b>32</b>
7.1. PARÂMETROS .....	32
7.1.1. Geometria.....	32
7.1.2. Tamanho dos Pontos .....	34
7.1.3. Distância.....	35
7.1.4. Ângulo .....	37
7.1.5. Frequência da Lâmpada Estroboscópica .....	38
7.2. PLANEJAMENTO DO EXPERIMENTO .....	40
7.3. GABARITO DE POSIÇÕES .....	45
7.4. EQUIPAMENTOS .....	47
7.4.1. Câmera.....	47
7.4.2. Acelerômetro .....	48
7.4.3. Lâmpada Estroboscópica .....	51
7.4.4. Inversor de Frequência.....	53
7.4.5. Mecanismo Excitador .....	54
7.5. PROGRAMAÇÃO.....	55
7.6. EXPERIMENTO .....	56
7.6.1. Determinar Erro de Amplitude de Movimento.....	60
7.6.2. Determinar Erro de Frequência .....	63
<b>8. ANÁLISES E RESULTADOS .....</b>	<b>65</b>
8.1. FREQUÊNCIA.....	65
8.2. AMPLITUDE .....	74
8.3. ANÁLISE ESTATÍSTICA .....	89
8.3.1. Análise Estatística Sobre O Erro De Frequência.....	89
8.3.2. Análise Estatística Sobre O Erro De Amplitude De Movimento.....	90
8.4. ANÁLISE ESTATÍSTICA DESCRITIVA.....	94

<b>9. CONCLUSÃO .....</b>	<b>98</b>
<b>10. REFERÊNCIAS.....</b>	<b>101</b>

## 1. INTRODUÇÃO

A necessidade de monitoramento e avaliação de equipamentos que estão em constante funcionamento reafirma a importância da análise e realização de estudos nas áreas de vibrações mecânicas em setores industriais. Devido a isso, a utilização de metodologias de análise está cada vez mais presente nos setores de manutenção de grandes e pequenas indústrias, pelo alto custo da aquisição, instalação e manutenção de projetos mecânicos.

De acordo com Rao (2009), cada equipamento possui um modo e uma frequência específica de vibração, citado até como assinatura de cada equipamento. Esta é constante durante todo o período em que o equipamento está em pleno funcionamento, mas como um dos primeiros sinais de desgaste, esta frequência natural se altera, alertando assim as equipes de manutenção sobre o desgaste do equipamento e a necessidade de manutenção.

A frequência do equipamento em funcionamento também difere da calculada teoricamente e só pode ser obtida com segurança quando instalada e em funcionamento no seu local de operação.

Além de informações sobre o desgaste do equipamento, a frequência natural de um equipamento também revela se o mesmo está sofrendo algum tipo de interferência dos equipamentos vizinhos, como a captação da vibração transmitida por elementos de contato como também a interferência causada por ressonância.

A análise da vibração de um equipamento é fundamental para o projeto e o bom funcionamento de sistemas de isolamento de vibração ativa, que podem interferir no funcionamento de equipamentos vizinhos gerando desgastes desproporcionais e imprevistos. Para a aquisição desses dados sobre cada equipamento se faz necessária a utilização de sensor de vibração, que é basicamente um instrumento sísmico composto por massa-mola-amortecedor montado sobre o corpo que está em movimento.

Os sensores de vibração são divididos em três tipos, como transdutores de deslocamento, acelerômetro, que é o equipamento utilizado neste trabalho e também

o transdutor de velocidade. Estes tem o seu funcionamento descrito na revisão bibliográfica deste trabalho.

Basicamente o acelerômetro é um transdutor capaz de medir a aceleração. Este utiliza o efeito piezoelétrico que ao menor movimento gera um sinal elétrico que é captado com um analisador de dados e transmitido a um computador.

Porém, a utilização do acelerômetro necessita de um profissional capacitado especificamente e também de um alto grau de investimento no equipamento, já que é um equipamento de alto custo e alta sensibilidade, podendo ser inutilizado por qualquer dano causado ao sensor ou a seus respectivos acessórios.

A análise de vibração por processamento de imagem vem como uma alternativa de baixo custo e com possibilidades diferentes de aplicação quando comparado ao acelerômetro, apresentando uma grande capacidade para utilização desta nova metodologia de análise, que é o principal objetivo deste trabalho.

O desenvolvimento desta metodologia e os testes realizados para tal, assim como os resultados obtidos estão apresentados nas seções que se seguem.

## **2. DELIMITAÇÃO DO TEMA**

O presente trabalho visa o desenvolvimento de um novo método de análise de vibrações mecânicas, atuando de forma diferente aos métodos já desenvolvidos e amplamente difundidos entre as indústrias e laboratórios.

Esta metodologia trabalha com a análise de estruturas sem a necessidade de um sensor de contato com o objeto estudado. Dessa forma, utilizam-se apenas câmeras de vídeo e um código desenvolvido no trabalho de conclusão de curso através da plataforma Matlab, para a análise dos resultados. Esta metodologia possibilita o estudo de equipamentos em tempo real e vinte e quatro horas por dia, possuindo um custo de investimento relativamente menor quando comparado ao necessário para a aquisição de um acelerômetro.

A análise de vibrações por processamento de imagens vem como alternativa de fácil acesso e baixo custo para a obtenção destes dados. Dessa forma, não existe a necessidade de fixação de um sensor na estrutura e a possibilidade de um exame a uma determinada distância da estrutura. Isso vem como as principais vantagens do desenvolvimento e da otimização desta metodologia.

### **3. PROBLEMAS E PREMISSAS**

O projeto tem como base o alto custo da aquisição, operação e investimento para a utilização dos sensores de vibração difundidos no mercado. A alta complexidade da utilização dos mesmos, torna a análise de vibrações uma tarefa cara e complexa.

Alem dos fatores econômicos citados, existem os fatores práticos, os métodos de análise utilizados atualmente não são práticos para análises em campo, devido a complexidade e sensibilidade dos mesmos, um estudo em campo com tais instrumentos gera riscos elevados de danos materiais para análises muitas vezes simples e de curto período de tempo, o que seria possível se houvesse uma alternativa viável e capaz de realizar tal análise.

Dessa forma, este projeto atua na busca por uma alternativa capaz e viável de realizar tais análises, onde a utilização dos métodos atuais não é possível, sendo além de uma alternativa ou novo método de análise, possibilitando assim a ampliação da utilização de estudos de vibrações mecânicas em indústrias e centros tecnológicos.

## **4. OBJETIVO**

### **4.1. OBJETIVO GERAL**

O trabalho de conclusão de curso (TCC), na área de análise de vibrações por processamento de imagens, tem como objetivo o desenvolvimento de uma metodologia de análise de vibrações mecânicas simples, a fim de facilitar um processo cujo grau de dificuldade de realização era alto. Propõe-se também o desenvolvimento de um sistema de medida de baixo custo quando comparado aos atuais sistemas de medidas de precisão, mas de forma completamente diferente dos atuais modelos de precisão utilizados.

Essa metodologia permite a análise de uma estrutura sem a utilização de um sensor de contato, utilizando apenas câmeras de vídeo e um código desenvolvido no trabalho de conclusão de curso, ambos em comunicação direta. Possibilita-se assim o estudo de vibrações mecânicas em equipamentos e estruturas em tempo real e de múltiplos pontos de medidas simultâneos. Além disso, possui um custo de investimento menor quando comparado a um acelerômetro.

O objetivo geral é o desenvolvimento de uma metodologia de análise de vibração por processamento de imagem. Esta será utilizada como base para futuros estudos na área e comprovada através de métodos já difundidos, cujos erros já estão definidos e aceitáveis para realização de medidas.

### **4.2. OBJETIVO ESPECÍFICO**

O objetivo específico do trabalho é o desenvolvimento de um procedimento que relacione a melhor combinação de parâmetros para garantir o menor erro de leitura conferindo assim maior confiabilidade ao experimento. Além disto, pretende-se desenvolver um código capaz de analisar os dados obtidos pela câmera, retornando uma matriz resposta, na qual é possível mensurar a diferença em relação a outro instrumento de medida, no caso o acelerômetro.

## 5. JUSTIFICATIVA

De acordo com a bibliografia consultada existem diversas maneiras possíveis de se analisar as vibrações em estruturas mecânicas, as mesmas podem ser realizadas através da combinação de inúmeros equipamentos, todos com o objetivo de coletar os dados e apresentá-los da maneira mais exata possível, criando erros cada vez menores entre os dados coletados e os reais.

Porém, a utilização dos equipamentos para tais fins é realizada somente com profissionais altamente capacitados, o que por si só já é um investimento de custo elevado, além da necessidade de equipamentos com também custo elevado e alta sensibilidade, sendo influenciado tanto pela posição onde os mesmos são colocados como por fatores locais, como temperatura e clima.

A análise em questão vem como alternativa de fácil acesso, baixo custo, simplicidade de leitura, não necessidade de fixação de um sensor, possibilidade de um exame a uma determinada distância, obtenção de dados de forma online através da rede de internet ou qualquer outra ferramenta de contato entre câmera e computador, monitoramento em tempo real múltiplos pontos de mapeamento. Esses e outros pontos vêm como principais vantagens do desenvolvimento e da otimização da metodologia.



## 6. REFERENCIAL TEÓRICO

### 6.1. CONCEITOS BÁSICOS DE VIBRAÇÕES

A vibração é um movimento repetitivo que acontece durante um determinado tempo. Essa vibração possui partes essenciais para a realização do movimento e deve possuir um meio que armazena a energia potencial, outro meio que através de massa ou inércia possa armazenar a energia cinética e também um modo de perda de energia gradualmente. Amortecedores são normalmente utilizados para este fim.

O funcionamento de um sistema em vibração consiste na alteração da energia de acordo com a repetição do ciclo, onde a energia varia ciclicamente de energia potencial à energia cinética. Em casos de sistemas amortecidos, uma parte da energia não retorna para a potencial, mas sim é dissipada para o amortecedor.

As vibrações podem ser modeladas por diferentes graus de liberdade que variam de acordo com cada modelo matemático e também com a exatidão do mesmo. De acordo com Rao (2009), grau de liberdade nada mais é do que um número mínimo de coordenadas independentes necessárias para determinar as posições, em qualquer instante de tempo, de todas as partes envolvidas no sistema.

Estas podem ser classificadas de acordo com algumas características, podendo ser vibração livre ou forçada, vibração não amortecida e amortecida, vibração linear e não linear e vibração determinística ou aleatória.

A vibração livre é determinada quando um sistema continua em vibração por conta própria após ser excitado inicialmente, diferente de vibração forçada, que é determinada quando a vibração do sistema é devido a uma força externa. Quando a força é retirada, o sistema para de vibrar.

Outra classificação de um sistema de vibração é em relação ao amortecimento. Quando o sistema não perde energia durante os ciclos de repetição ou a energia perdida é considerada insignificante para a análise a ser realizada, o mesmo é considerado como sistema não amortecido. Entretanto, quando a perda de energia do sistema é devido a algum corpo de amortecimento ou a perda de energia é considerável o mesmo é denominado de sistema amortecido.

A linearidade do sistema de vibração é outro parâmetro de classificação. Os sistemas lineares são determinados quando os mecanismos do sistema, como massa, mola e amortecedor, possuem um comportamento linear, estes são denominados lineares e, para estes sistemas, os modelos matemáticos funcionam de modo eficiente podendo modelar com exatidão o sistema. Porém, quando o comportamento dos mesmos não apresenta linearidade, o sistema é denominado não linear e sua modelagem se torna mais difícil de ser realizada e o erro é aumentado.

As vibrações também podem ser classificadas em relação à magnitude de excitação do sistema. Quando a vibração pode ser determinada e conhecida em qualquer instante é determinada de determinística, e conseqüentemente a vibração deste sistema também leva a classificação de vibração determinística. Todavia, quando essa magnitude de excitação não pode ser determinada ou conhecida, esta é denominada de vibração aleatória.

## 6.2. PROCEDIMENTO PARA ANÁLISE DE VIBRAÇÕES

Um sistema em vibração é um sistema dinâmico, pois sofre influência de excitações e respostas, que são dependentes dos parâmetros de excitação de entrada no sistema e ambos variam de acordo com o tempo. Em situações práticas, sistemas em vibração possuem grande dificuldade de serem modelados matematicamente já que possuem a influência de fatores diversos que muitas vezes não podem ser mensurados ou identificados. Assim, os sistemas são modelados considerando somente as características mais importantes do sistema.

A análise de vibrações normalmente é dividida em três etapas, sendo elas a modelagem matemática, obtenção de equações governamentais, a solução das equações e conseqüentemente, a análise e interpretação dos resultados.

### 6.2.1. Modelagem Matemática

A modelagem matemática possui como principal objetivo representar as características importantes do sistema analisado, obtendo equações que dirigem o comportamento no sistema. Estes podem ser lineares, que devem apresentar

características do sistema que tornem possíveis a análise do mesmo sem complexidade. Podem também ser não lineares, quando estes apresentam maior complexidade de análise mas se aproximam mais da realidade prática do sistema.

#### 6.2.2. Derivação das Equações Governantes

Como segunda etapa na análise de vibrações temos a derivação das equações governantes. Estas são encontradas através da modelagem matemática, descrita anteriormente, que, utilizando de princípios de dinâmica são capazes de descrever a vibração do sistema. A partir disto, torna-se possível a análise do movimento através de equações de movimento.

Nessa etapa da análise são utilizadas diferentes abordagens, como a Segunda Lei de Newton, o princípio da conservação de energia assim como o Princípio de D'Alembert.

#### 6.2.3. Solução das Equações Governantes

Após a etapa de derivação das equações que descrevem o movimento do sistema vibratório através de métodos de resolução de equações diferenciais é possível resolver essas equações e encontrar a resposta do sistema vibratório. Para esse fim, são utilizados métodos como a transformada de Laplace, métodos numéricos e também matriciais.

#### 6.2.4. Interpretação dos Resultados

Como última etapa do processo de análise de um sistema em vibração, se tem a interpretação dos resultados. Através da solução das equações governantes obtêm-se dados como velocidades, acelerações e também deslocamento de todos os componentes considerados na modelagem, sendo resultados considerados para análise do projeto a ser realizado.

### 6.3. MEDIÇÃO VIBRAÇÃO

Um esquema de medição de vibração mecânica funciona basicamente a partir do posicionamento de um transdutor ou sensor de vibração, sobre a estrutura analisada. O transdutor é um dispositivo responsável por captar um determinado valor em quantidades mecânicas e transformá-las em um sinal elétrico, como corrente ou tensão. Entretanto, o sinal elétrico gerado em um transdutor é muito pequeno e existe a necessidade de um sistema de ampliação de sinal para que este possa ser analisado e armazenado em computador.

#### 6.3.1. Transdutor

Como já citado anteriormente, um transdutor é um equipamento que converte um sinal mecânico em um sinal elétrico. Existem vários tipos de transdutores, porém os quatro tipos mais utilizados, são os transdutores de resistência variável, piezelétricos, eletrodinâmicos e transdutor transformador diferencial linear variável. A seguir estão às características de cada um.

##### 6.3.1.1. Transdutor de resistência variável

Um transdutor de resistência variável pode ser composto por reostatos, extensômetros ou semicondutores, onde o movimento mecânico causa uma mudança na resistência elétrica provocando uma mudança no sinal elétrico de saída. De acordo com Rao (2009), um extensômetro é formado basicamente por um arame fino onde a resistência elétrica se altera quando ocorre uma deformação mecânica no mesmo.

Dessa forma, quando o extensômetro é posto em contato com uma estrutura que está sofrendo deformação, o movimento do extensômetro torna-se o mesmo movimento realizado pela estrutura e a alteração na resistência mecânica indica a deformação na estrutura. Ligas de cobre-níquel são normalmente utilizados nos arames de extensômetros.

### 6.3.1.2. Transdutor piezelétrico

Materiais piezelétricos são aqueles que quando submetidos a esforços mecânicos geram pequenas cargas elétricas, onde as mesmas desaparecem assim que o esforço sobre o material é retirado. Estes materiais são normalmente formados por quartzo, turmalina, sal de Rochelle ou sulfato de lítio, podendo ser fabricadas ou obtidas de forma natural.

O funcionamento típico de um transdutor piezelétrico é exemplificado quando um corpo em vibração pressiona um material piezelétrico. Esta vibração e a aplicação variável de carga sobre o material variam de acordo com a aceleração do corpo, fazendo com que o sinal elétrico gerado pelo material seja proporcional a aceleração do corpo.

Entre as principais vantagens de transdutores piezelétricos estão o seu tamanho reduzido, alta sensibilidade e a grande gama de frequências de leitura possíveis.

### 6.3.1.3. Transdutor transformador diferencial linear

Este transdutor consiste no arranjo de três bobinas em linha, sendo a primeira disposta no centro e as secundárias dispostas nas laterais, onde as três compartilham do mesmo núcleo magnético e este pode movimentar-se sem restrições no sentido axial das bobinas.

Uma tensão em corrente contínua é aplicada a bobina primária, gerando uma tensão de saída igual a diferença entre as tensões aplicadas às bobinas secundárias. Estas são dependentes do acoplamento ao núcleo magnético que varia de acordo com o deslocamento axial.

As duas bobinas secundárias estão em oposição de fase. Sendo assim, quando o núcleo magnético estiver na posição média, a tensão de saída será igual a zero, devido a defasagem entre as bobinas formar  $180^\circ$ . Dessa forma, quando o núcleo se deslocar para qualquer um dos lados a polaridade indicará o sentido do deslocamento.

Este transdutor tem como principal vantagem o fato de não sofrer alterações com a variação da temperatura, estando disponível no mercado com uma faixa de deslocamento que varia de 0,0002 a 40 cm.

### 6.3.2. Sensores De Vibrações

Um sensor de vibração é formado quando utilizamos um transdutor juntamente com outro dispositivo para análise de vibrações e os mais utilizados são conhecidos como instrumentos sísmicos. Este é formado basicamente por um sistema massa-mola-amortecedor instalado sobre um corpo em vibração.

Essa massa-mola-amortecedor é posicionada dentro de uma forma de gaiola e esta sobre o corpo em vibração. A gaiola movimenta-se com a vibração do corpo e causa uma excitação na massa suspensa pela mola e pelo amortecedor, gerando assim um sinal de vibração.

Os três tipos de sensores de vibração são o transdutor de deslocamento, o acelerômetro e o transdutor de velocidade.

#### 6.3.2.1. Transdutor de deslocamento

Este também é denominado de vibrômetro ou sismômetro e é um instrumento utilizado para medir o deslocamento de um corpo vibratório. O transdutor apresenta um atraso em relação ao deslocamento real devido a um atraso de fase, mas o mesmo é considerado como não sendo importante quando o deslocamento da base consiste em uma única componente harmônica.

A Figura 1 apresenta o gráfico de resposta de um instrumento de medição de vibração, onde  $Z$  e  $Y$  são o deslocamento no corpo vibratório e o deslocamento no sensor de vibração. O eixo horizontal apresenta a relação entre a frequência de excitação  $\omega$ , e a frequência natural do sensor de vibração  $\omega_n$ , onde uma relação igual ou maior que 3 é indicada para um medidor de deslocamento e a faixa menor que 1 para os acelerômetros.

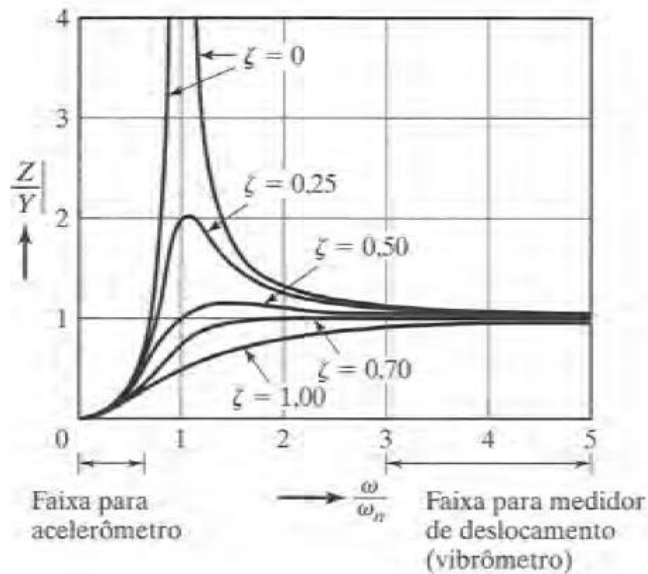


Figura 1 - Resposta de um instrumento de medição de vibração.  
Fonte: RAO, 2009

Devido à relação ideal entre a frequência de excitação e a frequência natural ser um valor grande e a frequência de excitação ser fixa, requer que a frequência natural do sistema seja de um valor baixo, o que significa que o sistema deve ter uma massa grande e uma mola de baixa rigidez.

Devido a essas implicações, o transdutor de deslocamento se torna um instrumento grande, o que o torna inconveniente para determinadas aplicações.

#### 6.3.2.2. Acelerômetro

Os acelerômetros são utilizados para medir a aceleração de um corpo em vibração. É utilizado em medições de vibrações e tremores sísmicos e neste experimento é o equipamento utilizado para a identificação do erro em relação aos valores medidos com a utilização da metodologia proposta.

Como apresentado na figura 1, no caso do acelerômetro teremos uma relação entre frequência de excitação e frequência natural pequena, variando de 0 até no máximo 0,6, garantindo ao instrumento uma frequência natural grande quando comparada com a frequência medida. Sendo assim, o instrumento deve conter uma massa pequena mas uma mola com alta constante elástica.

Devido a estas características, o acelerômetro é um instrumento pequeno e com grande sensibilidade, tornando-o um dos mais utilizados para utilização em análises de vibrações mecânicas. A figura 2 apresenta as formas mais comuns de acelerômetros e um diagrama esquemático sobre a composição dos mesmos.

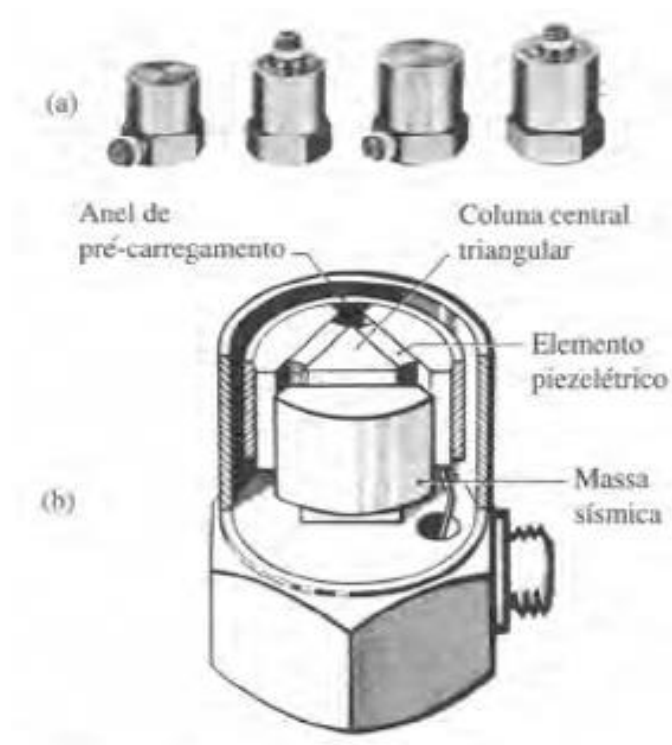


Figura 2 - Acelerômetros.  
Fonte: RAO, 2009

### 6.3.2.3. Transdutor de velocidade

Os transdutores de velocidade são utilizados para a mensuração da velocidade de corpos em vibração. Este é dimensionado de forma diferente do anterior, podendo variar seu tamanho e capacidade de análise dependendo da necessidade de cada aplicação.

### 6.3.3. Instrumento de Medição de Frequência

Os instrumentos utilizados para a medição da frequência são normalmente do tipo mecânicos ou elétricos. Todos estes baseiam-se no princípio fundamental da ressonância, entre os mecânicos o funcionamento varia entre o tacômetro de Fullarton



ou o tacômetro de Frahm e o elétrico tem o funcionamento de pulsos intermitentes de luz, este é denominado de Estroboscópio e será descrito posteriormente.

#### 6.3.3.1. Tacômetro de Fullarton

O tacômetro de Fullarton consiste na utilização de uma tira que é posicionada em balanço com uma massa em uma de suas extremidades. A outra extremidade da tira é presa e o comprimento da mesma pode ser alterado variando em uma escala pré-determinada.

Cada um dos pontos de comprimento da tira corresponde a uma frequência de vibração. Então quando uma das extremidades da tira fixa-se ao corpo vibrante, a mesma apresenta um deslocamento na outra extremidade e conforme se varia a escala da tira, alterando as frequências, varia a amplitude do movimento da extremidade solta da tira.

Quando esta amplitude chega ao máximo, a mesma está em ressonância, apresentando que a frequência em que a tira está posicionada é a frequência do corpo vibrante.

#### 6.3.3.2. Tacômetro de Frahm

O Tacômetro de Frahm é composto por várias palhetas, todas com massas em uma de suas extremidades e a outra é presa ao corpo em vibração. Cada uma das palhetas possui uma frequência natural diferente e conhecida. Quando as palhetas são montadas sobre o corpo em vibração, a palheta que sofrer maior influência e desenvolver a maior amplitude será a palheta com frequência natural mais próxima da frequência do equipamento.

#### 6.3.3.3. Estroboscópio

Este é um equipamento que tem seu funcionamento baseado em produzir pulsos de luz intermitentes, os quais tem sua frequência configurada de acordo com o desejado no próprio instrumento.

Quando os pulsos de luz incidem sobre algum ponto no objeto em vibração e o mesmo aparece estacionário, significa que a frequência configurada dos pulsos de luz é igual a velocidade de vibração do equipamento, tendo como principal vantagem o fato do mesmo não entrar em contato com o objeto estudado.

#### 6.3.4. Excitadores de Vibrações

Excitadores de vibrações são normalmente utilizados em análises de vibrações. São aplicados para provocar uma determinada vibração na estrutura que permita que a mesma possa ser analisada, tanto em ensaios de determinação das características de determinada estrutura como em ensaio de fadiga de materiais.

Existem vários tipos de excitadores de vibrações, porém os mais utilizados são os mecânicos e os eletromagnéticos. Os mesmos estão apresentados a seguir.

##### 6.3.4.1. Excitadores mecânicos

O excitador mecânico é basicamente um mecanismo composto por um motor e um braço de manivela em que o motor pode operar com velocidade constante ou variável.

É possível vibrar uma estrutura de duas formas, aplicando uma força harmônica devido a uma força de inércia ou aplicando uma força harmônica devido a força de uma mola elástica. Vibradores desse modo geralmente são utilizados para excitar frequências inferiores a 30hz e cargas inferiores a 700 N.

Outro modo de excitador mecânico também utilizado é o desbalanceamento de massas giratórias. Utiliza-se quando duas massas que giram a mesma velocidade, porém com sentidos contrários, são posicionadas sobre o corpo analisado, gerando uma força sobre a estrutura. Este tipo de vibrador pode gerar cargas de até 25000 N.

##### 6.3.4.2. Excitador eletrodinâmico ou eletromagnético

Este excitador funciona de modo inverso ao funcionamento de um transdutor de eletrodinâmico. O equipamento analisado é excitado devido à corrente aplicada a

uma bobina instalada em um campo magnético. O campo magnético é efeito do uso permanente de ímãs em pequenos excitadores ou do uso de eletroímãs em grandes excitadores.

A magnitude da vibração depende diretamente da corrente máxima e das massas dos componentes e do elemento móvel do excitador. Quando a corrente aplicada varia harmonicamente a força aplicada também varia harmonicamente com tempo, todavia, quando a corrente aplicada é contínua a força gerada também é constante. Excitadores eletromagnéticos são utilizados em conjunto com elementos de excitadores mecânicos, como inércia ou molas.

Bobina e elemento móvel devem ter um movimento linear entre si, e devido a isso encontram-se suspensos em um suporte flexível. Consequentemente, o conjunto possui duas frequências naturais, uma do suporte e uma do elemento móvel.

Excitadores eletromagnéticos podem gerar forças de até 30000 N e deslocamento de até 25mm com uma faixa de frequência de 5 Hz a 20 kHz.

## 6.4. CONCEITOS BÁSICOS DE IMAGEM DIGITAL

### 6.4.1. Estrutura de uma câmera digital

As câmeras digitais recebem, assim como todo aparelho eletrônico, novas ferramentas de processamento de imagens e características a cada nova geração, a fim de melhorar a qualidade de imagem e facilitar a utilização da mesma pelo usuário. Porém, a estrutura básica de componentes e algumas características construtivas são fatores em comum entre as gerações de câmeras.

Basicamente, as câmeras digitais são compostas por uma lente (ou conjunto de lentes), um sensor de luminosidade, um sistema de processamento de imagens e uma mídia de armazenamento interna e/ou externa de imagem.

#### 6.4.1.1. Lente

Uma lente fotográfica (também conhecida como objetiva ou objetiva fotográfica) é uma lente óptica ou um conjunto de lentes, acoplados a uma câmera a fim de reproduzir imagens em uma mídia. A mídia é capaz de armazenar imagens quimicamente (filme fotográfico) ou eletronicamente (sensores). Em outras palavras, o elemento óptico capta a luz ambiente e foca no material sensível da câmera, esse material sensível pode ser o filme fotográfico ou sensores, dependendo da característica física da câmera.

As lentes utilizadas nas câmeras digitais podem ser fixas ou móveis, dependendo da sua construção. As lentes móveis, diferenciam-se das lentes fixas basicamente pela capacidade de aproximação ou afastamento do centro óptico da lente em relação ao material sensível. Ou seja, câmeras digitais com lentes fixas são capazes apenas de aplicar um zoom digital na imagem original, já as lentes móveis possibilitam a aplicação de um zoom mecânico, distanciando ou aproximando a lente do sensor, o que resulta em um zoom de maior qualidade de imagem.

Essas lentes, normalmente possuem algumas características de fabricação que podem ser classificadas como “defeitos de fabricação”. Isso pelo fato de distorcer a imagem capturada não-linearmente, necessitando de um pós tratamento de imagem pra corrigir esse defeito.

Segundo Lobão (2004), as imagens obtidas por câmeras de qualquer natureza estão sujeitas a distorções geométricas decorrentes de imperfeições e características de projeto e montagem das lentes e do elementos sensores. Esses defeitos de fabricação resultam em distorções não-lineares do tipo barril ou almofada (figura 3, respectivamente). Esses são os defeitos mais comuns encontrados nas câmeras comerciais e são subclassificações da distorção radial.

As distorções do tipo barril fazem com que as imagens capturadas aparentem estar com as bordas encurvadas para fora, enquanto as distorções do tipo almofada fazem parecer que as bordas estão encurvadas para o centro da imagem. Importante ressaltar que em uma área central essas distorções são reduzidas, enquanto nas bordas esse efeito é mais sensível.

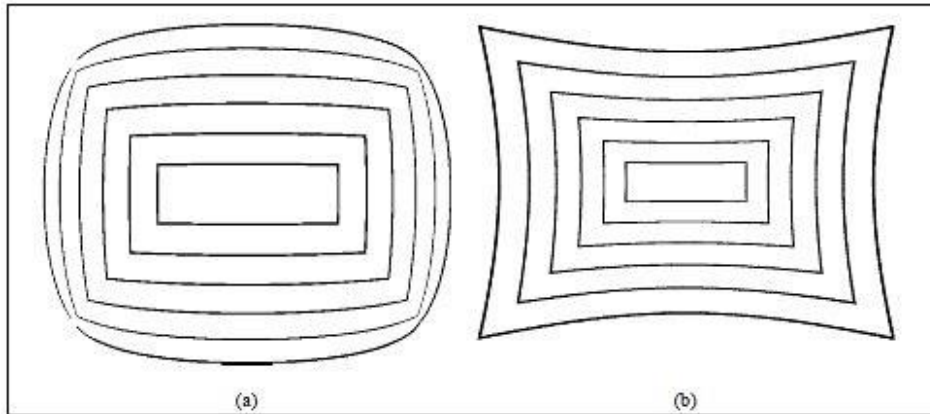


Figura 3 - Deformação Radial.  
 Fonte: Adaptação Lobão (2004).

Outro tipo de deformação não-linear é a distorção tangencial, que causa de certa forma uma deformação angular em algumas regiões da imagem capturada. Isso se deve a alguns fenômenos físicos decorrentes da dispersão dos centros ópticos em diferentes regiões da lente utilizada.

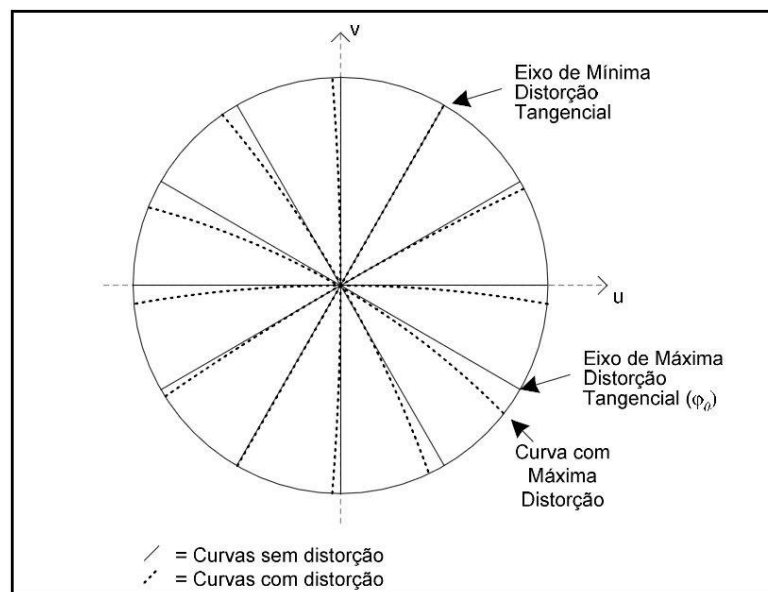


Figura 4 - Deformação Tangencial.  
 Fonte: Adaptação Lobão (2004).

#### 6.4.1.2. Distância focal

Uma maneira simples para determinar a distância focal, é através de medidas de espaço físico de uma imagem captada pela câmera, como pode ser visto na Figura 5.

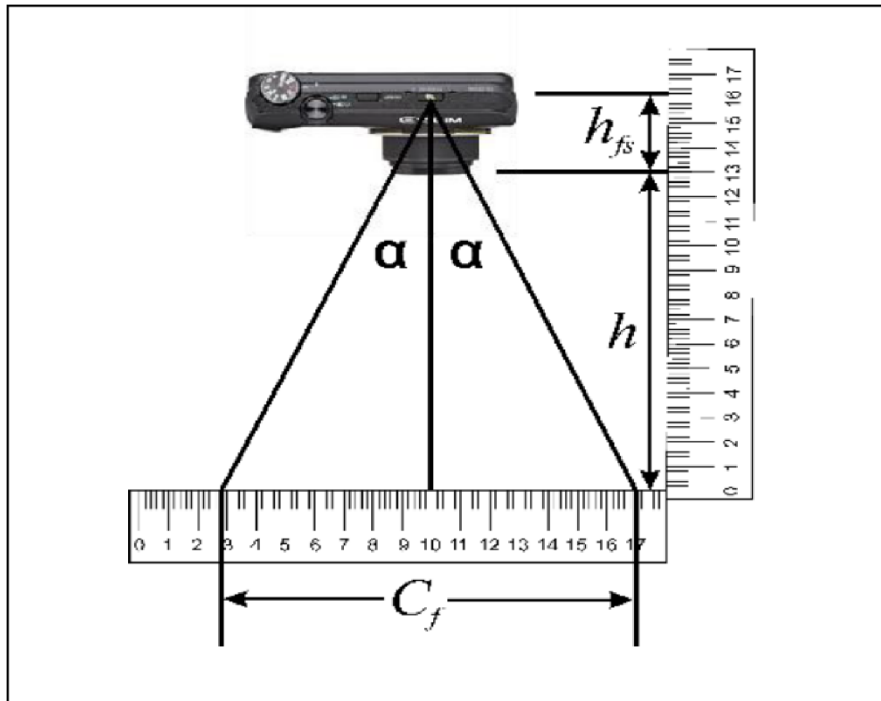


Figura 5 - Distância focal.  
 Fonte: Adaptação Sabino (2013)

Onde,  $C_f$  é o comprimento do fundo da imagem,  $\alpha$  é a metade do ângulo total da câmera para dada distância focal e  $h$  é a distância entre a face da objetiva e o objeto.

Assim, a distância focal pode ser determinada através de trigonometria pela Equação 1.

$$h_{sf} = \frac{C_f - 2 \tan(\alpha) h}{2 \tan(\alpha)}$$

Equação 1 - Distância focal.

Além disso, os limites das distâncias focais de uma câmera digital normalmente podem ser vistos, na forma de “ $f = X - Y \text{ mm}$ ”, grafados na própria câmera, onde  $X$  é a menor e  $Y$  é a maior distância focal desta lente e a relação entre o maior e o menor valor é conhecido como “vezes de zoom”. Por exemplo, assumindo que a objetiva possua o termo “ $f = 28 \text{ mm}$ ” e zoom = 10x, isto quer dizer que a distância focal ( $h_{sf}$ )

desta câmera para esta lente varia de 28 a 280 mm, o que resulta em até dez vezes de zoom mecânico.

#### 6.4.1.3. Ângulo de visão

O ângulo de visão de uma câmera é o quanto um conjunto de sensor e lente permitem de abertura para captura de imagem. Podem ser determinados pelo mesmo procedimento realizado para a determinação da distância focal da câmera, tanto para o ângulo de visão na horizontal quanto vertical, caso a lente não seja côncava perfeita, através da Equação 2.

$$\beta = 2 * \alpha$$

Equação 2 - Distância focal.

### 6.5. TAMANHO DA IMAGEM

A resolução efetiva de uma câmera digital é definida de acordo com Bellé (2010) como sendo o valor obtido em pixel da multiplicação da quantidade de pixel que formam o eixo horizontal pela quantidade de pixel que formam o eixo vertical do sensor da câmera, e, quanto maior o sensor de um câmera, maior a capacidade de componentes que o mesmo possui para transformar luz em pixels justapostos, e, quanto maior a resolução de cada pixel, mais a imagem pode ser ampliada sem a perda de resolução.

É possível saber o tamanho máximo da ampliação de uma imagem digital em centímetros, dividindo-se o número de pixels dos eixos da imagem pela resolução de saída da imagem, que, no caso de uma imagem impressa é representado por 300 dpi e traduzido significa pontos por polegada. O resultado desta relação apresentará o tamanho máximo que a imagem pode ser ampliada sem perda de qualidade visual.

### 6.6. PLANEJAMENTO DE EXPERIMENTO COM VÁRIOS FATORES

Experimento é definido basicamente como uma série de testes ou um teste específico, o mesmo é utilizado em diversas áreas e é uma metodologia para se estudar processos e sistemas. A validação dos resultados de experimentos científicos,

depende de como o experimento foi realizado. Dessa forma surge a necessidade do planejamento do experimento para desenvolver um dos papéis de grande importância na solução do problema inicial, sendo utilizado para desenvolvimento de produtos e processos produtivos.

#### 6.6.1. Experimentos Fatoriais

Experimento fatorial é utilizado no planejamento fatorial quando entram em questão no desenvolvimento do experimento a utilização de vários parâmetros diferentes, sendo que a influência de cada um deles altera o resultado final. De acordo com Montgomery (2012), experimento fatorial significa que para cada teste ou repetição do experimento, todas as combinações possíveis entre os parâmetros utilizados serão envolvidas.

Como o experimento fatorial mais simples, temos o experimento fatorial com dois fatores. Ele possui dois fatores sendo eles A e B e dentro de cada um desses fatores podemos ter inúmeros níveis, possuindo ainda o experimento várias repetições e em cada uma destas combinações diferentes dos diversos níveis dos fatores A e B, realizando as corridas de experimento das combinações de ordem totalmente aleatória, definindo assim este método de planejamento como totalmente aleatório.

Para a realização da análise estatística dos dados é utilizado um método denominado de análise de variância, abreviada como ANOVA. Esta, de acordo do Montgomery (2012), testa hipóteses utilizando a decomposição da variabilidade total dos dados em diversas partes, comparando os elementos presentes.

Este modelo também pode ser aplicado, com algumas limitações, a modelos com mais de dois fatores, voltando-se para experimentos fatoriais em geral, pois muitos dos experimentos a serem analisados não possuem somente dois fatores.

Outro método utilizado no planejamento de experimentos é o Planejamento Fatorial  $2^k$ , voltado para os experimentos que envolvem vários fatores e que necessitam da análise da influência em conjunto do efeito dos parâmetros analisados. Este método tem como principal utilização quando cada um dos parâmetros possui somente dois níveis, onde estes podem ser quantitativos ou qualitativos, o que permite



uma faixa de aplicação imensa tanto no meio industrial quanto científico, pela possibilidade de utilizar os dois tipos de fatores.  $N \times n$ .

Este planejamento é focado no estágio inicial de projetos experimentais, quando a influência de diversos fatores é possível e devem ser analisadas, fornecendo assim a menor quantidade possível de testes a serem realizados para que a análise dos parâmetros envolvidos possa ser considerada estatisticamente completa. Devido a análise de somente dois níveis por parâmetro, é necessária a suposição de que a resposta da análise seja linear entre o intervalo determinado entre os níveis de cada fator.

O modelo utiliza como método de aproximação dos valores quantitativos e qualitativos as análises dos níveis como sendo um mínimo e outro o máximo, denotando o máximo como +1, e o mínimo como -1, apresentando a tabela de combinações e testes a serem realizados como uma tabela com sinais positivos e negativos. Ele utiliza uma análise geométrica, onde cada um dos pontos do objeto formado representa um dos parâmetros a ser analisado.

## 7. PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

### 7.1. PARÂMETROS

A metodologia deste trabalho se inicia com a determinação dos parâmetros que influenciam de forma direta na leitura e interpretação dos dados neste método de experimento, os quais se forem alterados acarretaram em um resultado de leitura diferenciado.

Foi determinado um total de cinco parâmetros, os quais são:

- Geometria;
- Tamanho do Ponto;
- Distância entre a câmera e o ponto de leitura;
- Ângulo;
- Frequência da lâmpada estroboscópica.

Para cada parâmetro definido, foram determinados dois pontos de variação, sendo um deles o maior valor que o parâmetro irá atingir e o outro o menor valor, assim, cada parâmetro irá variar somente entre 2 pontos, o máximo e o mínimo. Essa limitação de valores se deve ao método de planejamento experimental adotado para este trabalho, o qual será apresentado a seguir.

#### 7.1.1. Geometria

O primeiro parâmetro a se definir foi em relação a geometria do ponto, esta está dividida em dois pontos, um ponto mínimo que é conhecido como geometria simples e um máximo denominado de geometria complexa.

O ponto mínimo, conhecido como geometria simples, indica a utilização de um único círculo, de diâmetro conhecido para realizar as leituras de dados. Este parâmetro foi definido focando-se na simplicidade do alvo, que permite a leitura de qualquer ponto que esteja destacado no corpo estudado.

Esse tipo de alvo é mais susceptível a interferências de figuras externas (ruídos), possibilitando uma medição com um maior erro. Além disso, uma figura com apenas um centroide em um plano inclinado acaba dificultando a medição de

amplitude de movimento, tornando-se necessária uma correlação de comprimento pixels com qualquer outra unidade de comprimento real.

Para diminuir os erros na leitura dos dados, foi proposta a utilização de uma geometria complexa como ponto máximo, isto é, a geometria utilizada para a análise é composta por 3 alvos diferentes, que nada mais são do que 3 circunferências de diferentes diâmetros, dispostas de tal forma que a união dos centroides destas circunferências formem uma circunferência de tamanho maior.

Este parâmetro máximo foi definido de acordo com Barbosa (2013), o qual indica que a utilização de uma figura composta por alvos distintos dispostos com um raio conhecido e fixo permite a leitura da câmera em um plano inclinado. Isso se deve ao fato dessa figura composta possuir um centroide proveniente do resultado dos centroides dos pontos distribuídos, ou seja, o baricentro da figura.

Na Figura 6 e na Figura 7 apresentam-se os dois níveis do parâmetro geometria, pontos de máximo e mínimo respectivamente.



Figura 6 - Geometria Simples (Ponto mínimo)  
Fonte: Autoria própria

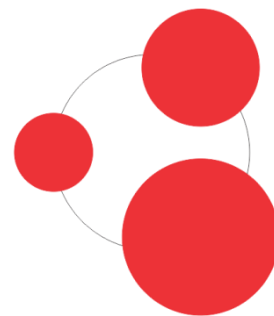


Figura 7 - Geometria Complexa (Ponto máximo)  
Fonte: Autoria própria

A definição da utilização da cor vermelha como a cor dos pontos se deve ao fato do vermelho ser uma cor viva, gerando grande percepção aos olhos humanos e até em animais, com luminosidade enquanto cor primária de 17%. Encontra-se em um número de cores que é evocado pela maior onda de luz visível ao olho humano, com comprimento de onda entre 630 a 740nm e frequência entre 480-400THz.

### 7.1.2. Tamanho dos Pontos

O segundo parâmetro a ser analisado e variado neste experimento é em relação a tamanho dos pontos, este possui dois limites, o máximo e um mínimo para cada um dos pontos utilizados no parâmetro de geometria do ponto, ou seja, para o ponto determinado como geometria simples existiram dois pontos, um como a geometria simples pequena e outra como a geometria simples grande, e assim também para o ponto geometria complexa.

O ponto grande é determinado devido a permitir o posicionamento da câmera a uma maior distância, mantendo uma imagem do ponto bem definida, uma vez que uma imagem com uma geometria mal interpretada resulta em um falso centroide, quadro a quadro, resultando em um erro acumulativo.

O ponto pequeno é determinado pelo mínimo tamanho que permita a captação de imagem a menores distâncias (alvo/câmera), possibilitando a redução da área de cobertura do corpo e conseqüentemente reduzindo ruídos externos.

A geometria simples, utilizando o ponto grande é formada por uma única circunferência de diâmetro de 8mm, este limite foi determinado de acordo com a capacidade da barra analisada. E a geometria simples utilizando o ponto pequeno é composta por uma única circunferência de diâmetro igual a três milímetro.

Já a geometria complexa utilizando o ponto grande é formada pela disposição em forma circular de três círculos com diâmetros crescentes, variando de quatro milímetros para o menor, de seis milímetros para o intermediário e de oito milímetros para o maior, onde a disposição destes a partir de seus centroides forma um círculo com diâmetro de vinte e cinco milímetros.

A geometria complexa com pontos pequenos é formada por círculos de três, cinco e sete milímetros, e sua disposição é igual a utilizada para o ponto grande, porém formando um círculo com diâmetro de vinte milímetros.

Na Figura 8 e na Figura 9 é possível observar a disposição dos parâmetros geometria e tamanho do ponto e seus respectivos tamanhos correspondentes.



Figura 8 - Geometria Complexa e tamanhos correspondentes em milímetros  
 Fonte: Autoria própria



Figura 9 - Geometria Simples e tamanhos correspondentes em milímetros  
 Fonte: Autoria própria

### 7.1.3. Distância

O terceiro e próximo parâmetro a ser analisado, está relacionado com a distância do posicionamento da câmera em relação ao ponto analisado. A distância da câmera até o alvo é determinada pelo tamanho do alvo a ser analisado. Portanto, de acordo com a metodologia utilizada por Sabino (2013), é possível determinar essas distâncias a partir da interseção do campo de nitidez em relação ao ponto definido anteriormente.

O diagrama da metodologia utilizada para definir o ponto máximo e o ponto mínimo do parâmetro distância é apresentada na figura 10.

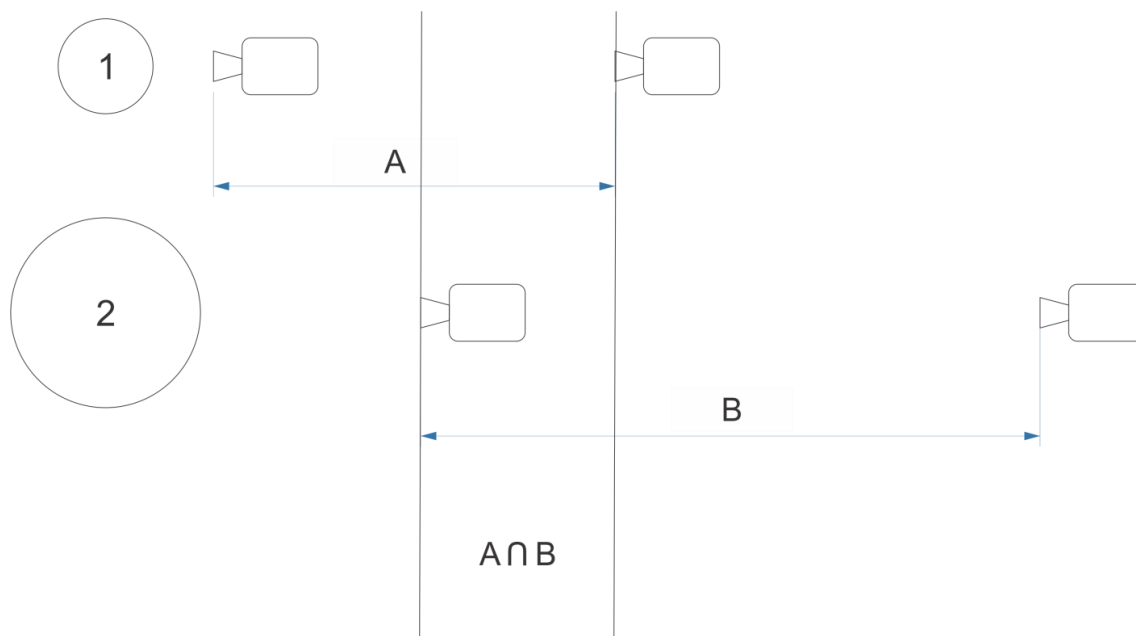


Figura 10 - Metodologia utilizada na determinação das distancias.  
 Fonte: Autoria própria

No diagrama da Figura 10, a distância denominada de A indica a distância a qual a nitidez do ponto pequeno, denominado de um é mantida. A distância denominada de B refere-se a distância a qual a nitidez do ponto dois, considerado como grande no parâmetro de tamanho do ponto, é mantida. As distâncias máxima e mínima devem estar dentro dos limites de distância focal da lente da câmera, que serão apresentados quando abordarmos as especificações técnicas da câmera escolhida.

O ponto mínimo foi determinado experimentalmente, considerando a menor distância entre alvo e câmera onde a nitidez do alvo maior é mantida com qualidade, permitindo assim que a câmera e o computador consigam analisar o ponto. Está foi definida experimentalmente como sendo de 50mm entre o alvo e a lente da câmera.

A definição do ponto máximo de leitura também foi determinada de forma experimental, levando em consideração que quando a câmera estivesse na distância máxima de leitura ainda seria possível a interpretação e a visualização, com boa nitidez, de uma geometria simples com ponto pequeno. Está foi determinada como sendo igual a 450mm.

#### 7.1.4. Ângulo

Como quarto parâmetro a ser analisado está a interferência da variação angular no sentido horizontal ao alvo de leitura, este foi escolhido como parâmetro pois o ângulo é relevante em determinadas medições em campo, onde nem sempre é possível que a câmera esteja perpendicular a estrutura analisada. A partir da determinação do erro de leitura do ângulo de inclinação da câmera em relação à estrutura, mas mantendo a metodologia que define os outros parâmetros, pode-se encontrar uma correção do erro devido à inclinação dessa câmera.

Assim como os demais parâmetros, a variação do ângulo também ocorrerá em dois pontos, um máximo e um mínimo, estes foram definidos experimentalmente levando em consideração a capacidade da câmera em manter o foco e a nitidez dos pontos.

O diagrama da Figura 11 demonstra como ocorrerá a variação angular durante o experimento, lembrando que L1 representa o ponto mínimo do parâmetro distância, este é de 50mm, e L2 represente o ponto máximo, este é de 450mm.

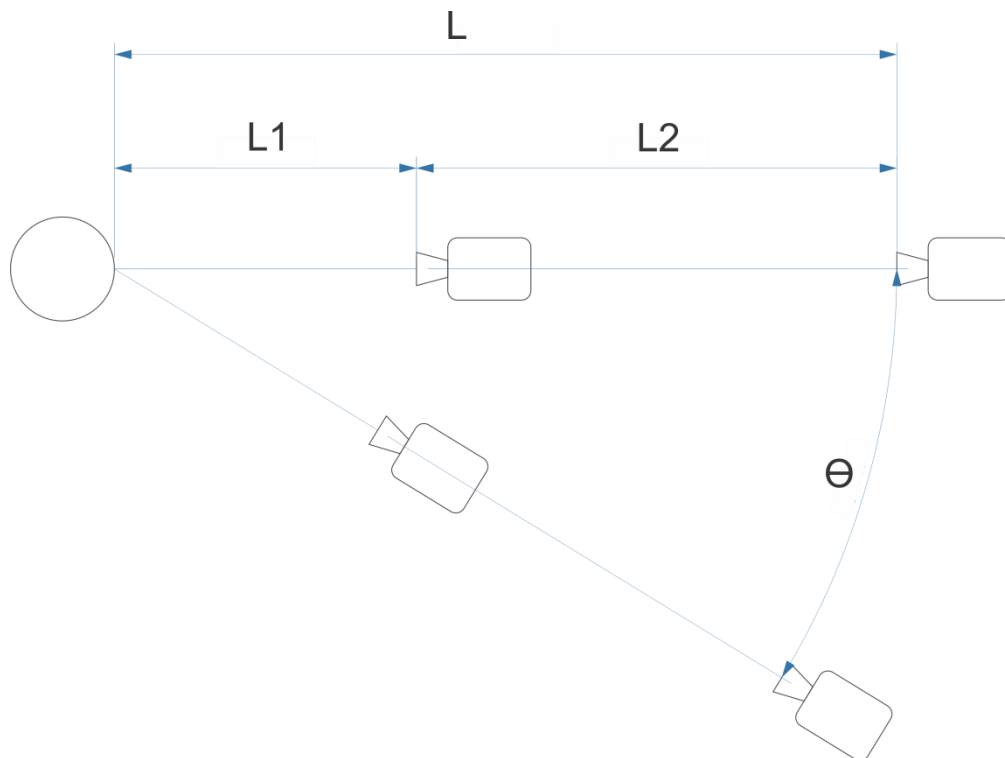


Figura 11 - Determinação da variação angular  
Fonte: Autoria própria

Dessa forma é possível encontrar como ponto máximo da variação angular uma inclinação igual a  $45^\circ$  e como ponto mínimo, foi utilizado uma inclinação de  $0^\circ$  em relação ao alvo, pois de acordo com Barbosa (2013), a captação de imagem em um plano paralelo entre câmera e alvo/plano de movimento é o ângulo que apresenta a menor diferença entre a leitura medida por processamento de imagem e a leitura do acelerômetro.

#### 7.1.5. Frequência da Lâmpada Estroboscópica

Devido à baixa frequência de captação de imagem da câmera utilizada, que é igual a 30fps (frames por segundo), se faz necessário a utilização de um ângulo de fase entre a frequência de excitação da estrutura e a frequência da lâmpada estroboscópica, possibilitando assim a leitura do movimento por uma câmera de baixa frequência.

Essa diferença de ângulo de fase permite que a câmera capte a variação do deslocamento em função do tempo de forma linear. Caso contrário, a leitura apresentará saltos de deslocamento, devido a alta frequência de excitação e a baixa frequência de captura de imagem da câmera, podendo até, captar o mesmo ponto na próxima onda e conseqüentemente exibirá um ponto estacionário.

A Figura 12 apresenta um diagrama que demonstra a necessidade da variação do ângulo de fase, neste é possível observar a diferença entre o momento em que a frequência de excitação da barra é igual à frequência da lâmpada estroboscópica e também apresenta o gráfico com a frequência da lâmpada em fase, onde os pontos representam o que a câmera captaria utilizando as frequências da lâmpada indicadas.



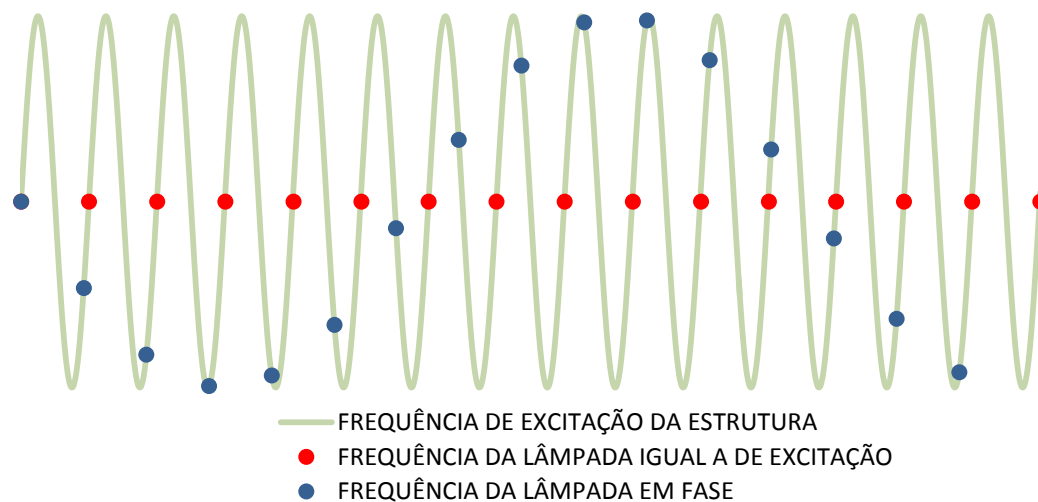


Figura 12 - Variação frequência da lâmpada estroboscópica  
 Fonte: Autoria própria

Como os demais parâmetros que serão analisados, a frequência da lâmpada estroboscópica também necessita de dois limites, onde a determinação desses limites é possível através de forma experimental, observando qualquer ponto na estrutura que está sendo excitada, analisando assim a variação da posição deste ponto quando a estrutura é visualizada com a utilização da lâmpada estroboscópica.

Desse modo é possível verificar onde a frequência da lâmpada estroboscópica em RPM corresponde à frequência de excitação enviada pelo inversor de frequência em Hz, determinando assim as frequências onde a variação da posição do ponto será nula.

A partir do conhecimento das frequências as quais a variação do ponto é nula, é possível obter os dois pontos limites para este parâmetro também de forma experimental. Assim foi possível determinar a frequência nula do ponto como sendo igual a 620RPM com uma frequência de excitação igual a 23,7Hz.

A frequência mínima da lâmpada estroboscópica que será utilizada foi possível determinar colocando-se uma pequena defasagem em relação a frequência do ponto nulo, esta deve ser suave de forma que o ponto realize poucos ciclos durante um segundo, e foi determinada como sendo igual a 5RPM, garantindo como ponto mínimo para este parâmetro uma frequência da lâmpada de 625RPM.

Para o ponto máximo, foi utilizada metodologia semelhante a anterior, aumentando somente a frequência defasada, e conseqüentemente aumentando o número de ciclos por segundo do ponto. Com uma defasagem de 44RPM é possível obter um ponto máximo de 664RPM. Esse ângulo de fase de 44RPM é determinado como a máxima frequência possível para que a câmera consiga captar ainda doze quadros em um ciclo, garantindo que a curva seja contínua, segundo literatura.

## 7.2. PLANEJAMENTO DO EXPERIMENTO

Para o planejamento do experimento, utilizou-se um método de planejamento fatorial para se encontrar a menor quantidade de testes necessários para que a análise da influência dos parâmetros envolvidos seja completa, possibilitando a futura repetição do experimento e a utilização do mesmo em trabalhos futuros.

O método fatorial utilizado foi o  $2^k$ , onde K é determinado pelo número de parâmetros utilizados e o índice informa que de cada parâmetro será definido dois níveis de máximos e mínimos, considerando assim que a variação entre estes dois níveis será linear.

Este método possibilita a utilização de parâmetros quantitativos e qualitativos, pois, como em cada um dos parâmetros será utilizado somente um valor máximo e um mínimo, o método utiliza em suas tabelas de planejamento de experimento o número -1 para indicar que o ponto utilizado será o mínimo do parâmetro analisado e +1 indicando que o ponto utilizado será o valor máximo do parâmetro analisado, isto aproxima os valores na tabela de planejamento do experimento, o que facilita a interpretação do planejamento e diminui a possibilidade de erros por má interpretação.

O planejamento foi realizado através do *software* Statgraphics Centurion XVII, levando em consideração o número de parâmetros escolhidos e que de acordo com método de planejamento de experimento o número de testes necessários é calculado através de um 2 elevado ao número de parâmetro, que são 5. O número de testes necessários para que a análise de cada parâmetro seja considerada completa será de 32 testes, estes irão variar em cada teste a posição de cada parâmetro escolhido, não repetindo nenhuma combinação.

Para a validação do experimento é necessário que o mesmo tenha repetitividade de um mesmo teste. Para evitar erros inesperados durante a execução do experimento, foram determinados que para cada teste realizado será necessário a realização de mais 3 experimentos contendo a mesma combinação de parâmetro e posições do teste inicial, totalizando 128 testes ao todo, contando com 32 combinações possíveis e mais 96 repetições. Isso tudo disposto em blocos diferentes, garantindo assim que em cada teste o parâmetro seja reajustado pelo operador.

Além das repetições realizadas para garantir a confiabilidade do experimento, a metodologia posiciona os testes de forma aleatória, o que indica que para cada combinação de parâmetros foi necessário à alteração dos valores contidos nos equipamentos e no posicionamento da câmera.

O *software* divide os experimentos em blocos, onde cada bloco contém todas as combinações possíveis dos parâmetros e de suas respectivas variações, considerando como um bloco a realização dos testes principais e nos demais a repetição dos testes, tornando a sequência de testes diferentes em cada bloco, para garantir maior confiabilidade e variação dos resultados.

Na Tabela 1, está apresentada a ordem dos parâmetros e os limites dos mesmos, juntamente com os indicativos dos valores na tabela de planejamento.

**Tabela 1 – Pontos Máximos e Mínimos dos Parâmetros**

<b>Parâmetros</b>	<b>Ponto Mínimo</b>	<b>Ponto Máximo</b>	<b>Indicador</b>
<b>Geometria</b>	Geometria Simples	Geometria Complexa	Qualitativo
<b>Tamanho do Ponto</b>	Pequeno	Grande	Qualitativo
<b>Distância</b>	50mm	450mm	Quantitativo
<b>Ângulo</b>	0º	45º	Quantitativo
<b>Frequência da Lâmpada</b>	625RPM	664RPM	Quantitativo
<b>Valor Adotado</b>	-1	1	

Tabela 1 - Pontos máximos e mínimos dos parâmetros.  
 Fonte: Autoria própria

A Tabela 2 apresenta a sequência de testes que será realizada para o bloco 1, e assim sucessivamente o bloco 2 consta na tabela 3, o bloco 3 na Tabela 4, e o bloco 4 na Tabela 5. Estas foram obtidas através do *software* Statgraphics Centurion, *software* profissional na execução de funções estatísticas o qual já fornece os blocos determinados para cada repetição do experimento.

**TABELA 2 – Sequência de Testes Para o Primeiro Bloco**

Bloco	Teste	Geometria	Tamanho	Distância	Ângulo	Frequência
1	1	1	1	1	1	-1
1	2	1	1	1	1	1
1	3	-1	-1	-1	1	-1
1	4	1	-1	-1	-1	-1
1	5	-1	-1	1	-1	1
1	6	-1	-1	-1	1	1
1	7	1	1	1	-1	1
1	8	-1	-1	1	1	-1
1	9	-1	1	1	-1	-1
1	10	1	1	-1	-1	1
1	11	1	1	1	-1	-1
1	12	-1	1	-1	-1	-1
1	13	1	-1	1	1	1
1	14	-1	1	-1	1	-1
1	15	1	-1	-1	1	-1
1	16	-1	1	1	-1	1
1	17	-1	1	-1	-1	1
1	18	1	-1	-1	1	1
	19	-1	1	-1	1	1
1	20	-1	-1	1	-1	-1
1	21	1	1	-1	1	1
1	22	-1	1	1	1	-1
1	23	-1	1	1	1	1
1	24	1	1	-1	-1	-1
1	25	-1	-1	-1	-1	-1
1	26	-1	-1	-1	-1	1
1	27	1	-1	-1	-1	1
1	28	-1	-1	1	1	1
1	29	1	-1	1	-1	-1
1	30	1	1	-1	1	-1
1	31	1	-1	1	-1	1
1	32	1	-1	1	1	-1

Tabela 2 - Sequência de testes para o primeiro bloco  
Fonte: Autoria própria

**TABELA 3 – Sequência de Testes Para o Segundo Bloco**

Bloco	Teste	Geometria	Tamanho	Distância	Ângulo	Frequência
2	33	1	1	1	1	-1
2	34	1	1	1	1	1
2	35	-1	-1	-1	1	-1
2	36	1	-1	-1	-1	-1
2	37	-1	-1	1	-1	1
2	38	-1	-1	-1	1	1
2	39	1	1	1	-1	1
2	40	-1	-1	1	1	-1
2	41	-1	1	1	-1	-1
2	42	1	1	-1	-1	1
2	43	1	1	1	-1	-1
2	44	-1	1	-1	-1	-1
2	45	1	-1	1	1	1
2	46	-1	1	-1	1	-1
2	47	1	-1	-1	1	-1
2	48	-1	1	1	-1	1
2	49	-1	1	-1	-1	1
2	50	1	-1	-1	1	1
2	51	-1	1	-1	1	1
2	52	-1	-1	1	-1	-1
2	53	1	1	-1	1	1
2	54	-1	1	1	1	-1
2	55	-1	1	1	1	1
2	56	1	1	-1	-1	-1
2	57	-1	-1	-1	-1	-1
2	58	-1	-1	-1	-1	1
2	59	1	-1	-1	-1	1
2	60	-1	-1	1	1	1
2	61	1	-1	1	-1	-1
2	62	1	1	-1	1	-1
2	63	1	-1	1	-1	1
2	64	1	-1	1	1	-1

Tabela 3- Sequência de testes para o segundo bloco  
Fonte: Autoria própria

**TABELA 4 – Sequência de Testes Para o Terceiro Bloco**

Bloco	Teste	Geometria	Tamanho	distância	Ângulo	frequencia
3	65	1	1	1	1	-1
3	66	1	1	1	1	1
3	67	-1	-1	-1	1	-1
3	68	1	-1	-1	-1	-1

Bloco	Teste	Geometria	Tamanho	distância	Ângulo	frequencia
3	69	-1	-1	1	-1	1
3	70	-1	-1	-1	1	1
3	71	1	1	1	-1	1
3	72	-1	-1	1	1	-1
3	73	-1	1	1	-1	-1
3	74	1	1	-1	-1	1
3	75	1	1	1	-1	-1
3	76	-1	1	-1	-1	-1
3	77	1	-1	1	1	1
3	78	-1	1	-1	1	-1
3	79	1	-1	-1	1	-1
3	80	-1	1	1	-1	1
3	81	-1	1	-1	-1	1
3	82	1	-1	-1	1	1
3	83	-1	1	-1	1	1
3	84	-1	-1	1	-1	-1
3	85	1	1	-1	1	1
3	86	-1	1	1	1	-1
3	87	-1	1	1	1	1
3	88	1	1	-1	-1	-1
3	89	-1	-1	-1	-1	-1
3	90	-1	-1	-1	-1	1
3	91	1	-1	-1	-1	1
3	92	-1	-1	1	1	1
3	93	1	-1	1	-1	-1
3	94	1	1	-1	1	-1
3	95	1	-1	1	-1	1
3	96	1	-1	1	1	-1

Tabela 4 - Sequência de testes para o terceiro bloco.  
Fonte: Autoria própria

**TABELA 5 – Sequência de Testes Para o Quarto Bloco**

Bloco	Teste	Geometria	Tamanho	distância	Ângulo	frequencia
4	97	1	1	1	1	-1
4	98	1	1	1	1	1
4	99	-1	-1	-1	1	-1
4	100	1	-1	-1	-1	-1
4	101	-1	-1	1	-1	1
4	102	-1	-1	-1	1	1
4	103	1	1	1	-1	1
4	104	-1	-1	1	1	-1

Bloco	Teste	Geometria	Tamanho	distância	Ângulo	frequencia
4	105	-1	1	1	-1	-1
4	106	1	1	-1	-1	1
4	107	1	1	1	-1	-1
4	108	-1	1	-1	-1	-1
4	109	1	-1	1	1	1
4	110	-1	1	-1	1	-1
4	111	1	-1	-1	1	-1
4	112	-1	1	1	-1	1
4	113	-1	1	-1	-1	1
4	114	1	-1	-1	1	1
4	115	-1	1	-1	1	1
4	116	-1	-1	1	-1	-1
4	117	1	1	-1	1	1
4	118	-1	1	1	1	-1
4	119	-1	1	1	1	1
4	120	1	1	-1	-1	-1
4	121	-1	-1	-1	-1	-1
4	122	-1	-1	-1	-1	1
4	123	1	-1	-1	-1	1
4	124	-1	-1	1	1	1
4	125	1	-1	1	-1	-1
4	126	1	1	-1	1	-1
4	127	1	-1	1	-1	1
4	128	1	-1	1	1	-1

Tabela 5 - Sequência de testes para o quarto bloco.  
Fonte: Autoria própria

### 7.3. GABARITO DE POSIÇÕES

Após a determinação dos parâmetros necessários e da realização do planejamento do experimento, foi realizado o projeto e a construção de um gabarito, o mesmo será utilizado para garantir o posicionamento correto da câmera de vídeo nas posições de máximo e mínimo dos parâmetros como distância e variação angular.

A Figura 13 apresenta o projeto do gabarito utilizado neste trabalho. Este foi projetado e construído com matérias de baixo custo, garantindo o baixo custo de realização do experimento.



Figura 13- Gabarito  
Fonte: Autoria própria

O gabarito apresentado na Figura 13, possui em sua mesa um diagrama com as posições e distâncias definidas anteriormente na seção de parâmetros. Este está apresentado na Figura 14.

Os pontos máximos e mínimos para o posicionamento em relação a distância já estão considerando a distância da mesa em relação ao ponto, garantindo os parâmetros definidos.



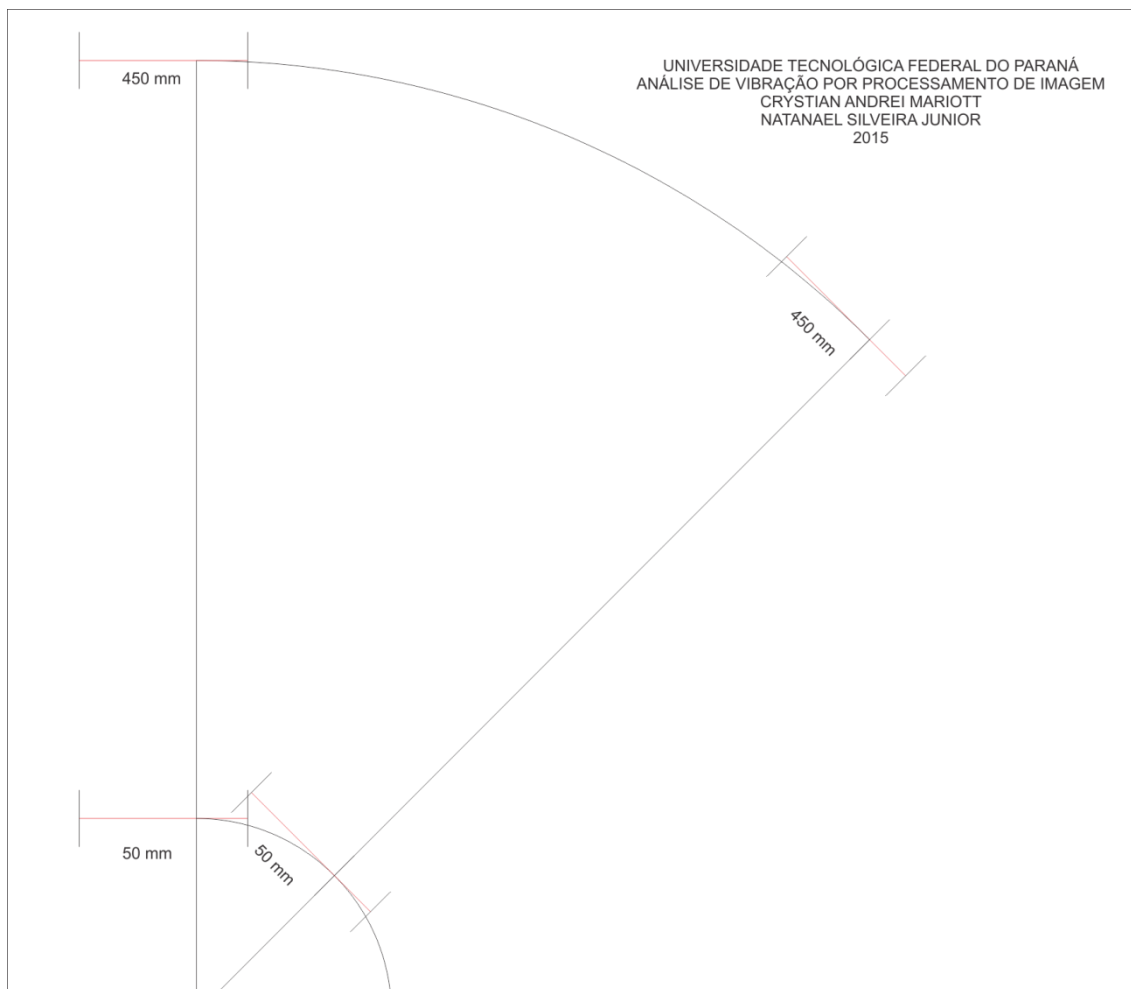


Figura 14 - Diagrama de Posicionamento  
Fonte: Autoria própria

## 7.4. EQUIPAMENTOS

### 7.4.1. Câmera

Dentro do objetivo deste trabalho está a busca pela realização da análise e captação dos dados com o menor custo possível, portanto, a escolha do equipamento de vídeo a ser utilizado levou como um dos principais fatores de escolha o seu preço e suas configurações comuns, facilmente encontradas em equipamentos de baixo valor agregado.

A câmera selecionada para este experimento é a Canon PowerShot A480, modelo este lançado em Janeiro de 2009 e com faixa de preço de atual de US\$ 259,99 de acordo com consulta em 6 de abril de 2015 no site de varejo [www.amazon.com](http://www.amazon.com).

Na Figura 15 estão apresentadas as especificações técnicas da câmera sobre as dimensões da imagem captada e especificações da lente.

<b>Specifications</b>	
<b>Type</b>	Compact digital still camera with built-in flash, 3.3x Optical/4x Digital/13x Combined Zoom
<b>Image Capture Device</b>	
<b>Type</b>	10.0 Megapixel, 1/2.3-inch type Charge Coupled Device (CCD)
<b>Total Pixels</b>	Approx. 10.3 Megapixels
<b>Effective Pixels</b>	Approx. 10.0 Megapixels
<b>Lens</b>	
<b>Focal Length</b>	6.6-21.6mm f/3.0-5.8 (35mm film equivalent: 37-122mm)
<b>Digital Zoom</b>	4x
<b>Focusing Range</b>	Normal: 1.6 ft./50cm-infinity Macro: 1.2 in.-1.6 ft./3-50cm (W), 9.8 in.-1.6 ft./25-50cm (T)
<b>Autofocus System</b>	TTL Autofocus

Figura 15 - Especificações Técnicas Canon A480.  
Fonte: Suporte Canon Powershot A480.

Como é possível observar na Figura 15, na configuração de foco macro, a câmera possui capacidade de foco entre 30mm a 50mm, o que confirma os pontos máximo e mínimo do parâmetro distância como dentro da capacidade de foco da câmera utilizada.

#### 7.4.2. Acelerômetro

O acelerômetro utilizado neste experimento é o equipamento da ENDEVCO 256-100, este é direcionado a mensuração de vibrações modais e gerais em estruturas de pequeno porte, analisando vibração ou choque. É um acelerômetro piezelétrico com eletrônica integral, que pode ser fixado na estrutura por montagem

adesiva, sendo que este possui uma camada dielétrica que isola a base a partir da superfície de montagem e tem o conector hermeticamente selado que aumenta a confiabilidade e permite que o mesmo seja utilizado em locais mais agressivos.

Este apresenta o elemento de cristal PIEZITE® P-8 que opera em modo de cisalhamento que apresenta excelente estabilidade térmica transiente, que, utilizando um amplificador de baixo ruído microeletrônico que transmite através do mesmo cabo de dois condutores que fornece a alimentação de corrente contínua. A Figura 16 apresenta as dimensões físicas do equipamento e possui uma massa de 3,2g, o que diminui o impacto sobre o experimento em comparação a acelerômetros de maior porte.

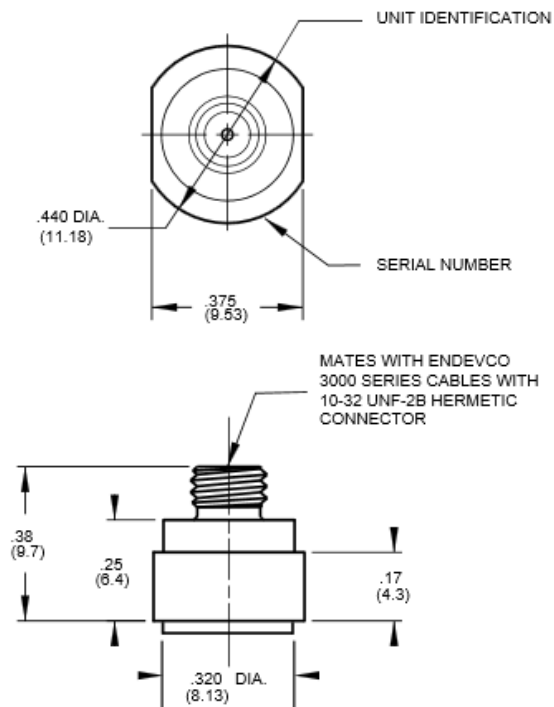


Figura 16 - Acelerômetro ENDEVCO 256-100 (dimensões em milímetros).  
Fonte: Datasheet ENDEVCO 256-10-100.

A Figura 18 apresenta a típica faixa de amplitude de resposta a qual o acelerômetro pode trabalhar, e esta calibrado para leituras de 20Hz a 50kHz, operando em um faixa de temperatura de -55°C a 125°C, que é possível observar na Figura 19. A Figura 17 apresenta as características dinâmicas de operação do acelerômetro.

DYNAMIC CHARACTERISTICS	Units	-10	-100
RANGE	g	±500	±50
VOLTAGE SENSITIVITY	mV/g	10	100
±10%			
FREQUENCY RESPONSE	See Typical Amplitude Response		
RESONANCE FREQUENCY	kHz	20	
AMPLITUDE RESPONSE			
±5%	Hz	1 to 8000	
±1 dB	Hz	.5 to 10 000	
TEMPERATURE RESPONSE	See Typical Curve		
TRANSVERSE SENSITIVITY	%	≤ 5	
AMPLITUDE LINEARITY	%	≤1 to full scale	

Figura 17- Características dinâmicas do acelerômetro.  
 Fonte: Datasheet ENDEVCO 256-10-100.

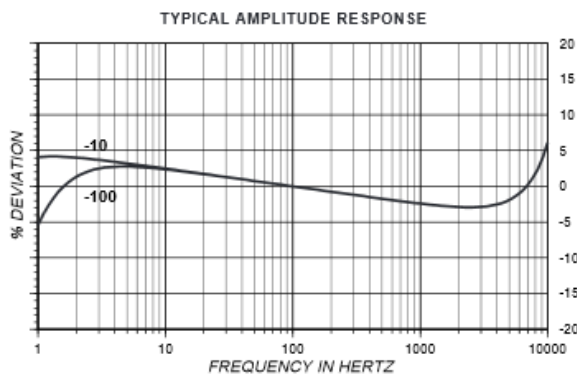


Figura 18 - Amplitude de resposta.  
 Fonte: Datasheet ENDEVCO 256-10-100.

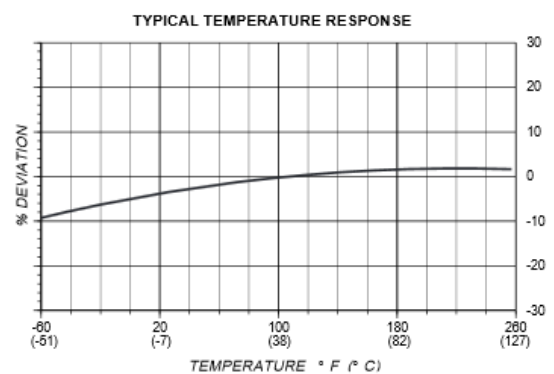


Figura 19 - Temperatura de resposta.  
 Fonte: Datasheet ENDEVCO 256-10-100.

O acelerômetro é acompanhado por um analisador de dados e o mesmo é responsável pela interpretação dos dados à transferência dos mesmos para o *software* no computador. O equipamento utilizado para tal fim será o 01DB dB4 de quatro canais juntamente com o *software* dBFA Suite, fornecidos pela Acoustic1.

O dB4 tem uma grande gama de aplicações, podendo ser utilizado para medições de ruídos e de vibrações, o mesmo, quando conectado a um *software* dBFA permite a análise, processamento e o monitoramento de estruturas em tempo real, podem estes serem utilizados em laboratório ou em campo, devido a praticidade do equipamento e versatilidade.

Esse equipamento possui quatro entradas analógicas de 24 bits IEPE (ICP®), operando com uma gama de +/-10V de saída, onde podem ser conectados os sensores para a captação dos dados, que neste caso será o acelerômetro, e mais uma entrada para o tacômetro, este pode ser sincronizado com os demais sensores e fornecer fluxos de dados correspondentes ao tempo.

Para a análise de dados utilizando um sensor de vibração, o módulo dB4 permite a utilização de uma corrente de 4mA para alimentação do sensor e a escolhe entre corrente contínua ou corrente alternada.

Este módulo tem embutido para medições de sistemas com corrente alternada elevada um mecanismo *anti-aliasing*, utilizando internamente conversores Delta Sigma para cada entrada analógica reduzindo o ruído e melhorando a precisão em casos de sobre amostragem, e o mesmo permite ainda a leitura simultânea nos quatro canais de frequências de até 52.734kHz.

Na Figura 20 é apresentado o diagrama de funcionamento do módulo de análise de vibrações dB4.

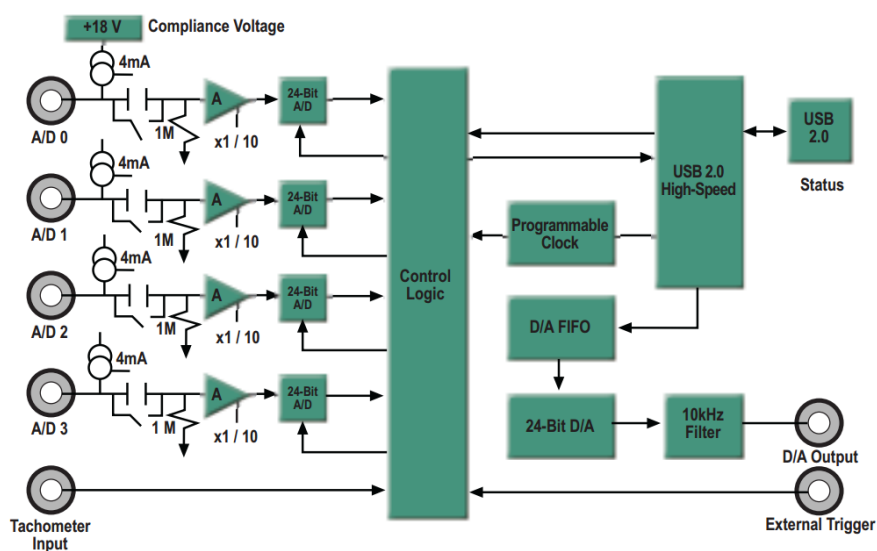


Figura 20- Diagrama dB4.  
Fonte: Datasheet dB4 Acoustic1.

### 7.4.3. Lâmpada Estroboscópica

A lâmpada estroboscópica que será utilizada está montada juntamente com outro sistema de análise de vibrações, o TEKNIKAO NK100, este é um equipamento medido de vibração e de balanceamento dinâmico em corpos rotativos.

Este sistema de aquisição de dados possui dois sensores, um de contato magnético para ser posicionado em mancais e peças da estrutura que estejam sobre

vibração, e também possui uma lâmpada estroboscópica, que será utilizada neste experimento.

O equipamento possui faixa de medida de frequência de 100 a 200.000 CPM (ciclos por minuto), com medidas em RMS de zero a pico e também seguindo a norma ISSO 2372, que é destinada a medida de vibração mecânica de máquinas com velocidades de operação de 10 a 200rev/s.

As configurações básicas do equipamento e as definições possíveis estão apresentadas na Tabela 6, visto que o parâmetro de frequência da lâmpada estroboscópica será a configuração da chave K CPM, selecionando assim os valores de máximo e mínimo deste parâmetro.

Na chave de STROB a configuração necessária será a utilização do OSC, caracterizando a lâmpada estroboscópica para ser acionada de acordo com a frequência da chave K COM, utilizando como unidade de medida do equipamento a velocidade.

### Descrição das chaves de funções

Chave	Função
K CPM	Seleciona a faixa de frequência de trabalho (RPM). Esta chave seleciona a faixa de frequência em que o filtro deve atuar, a faixa de frequência da unidade estroboscópica e a faixa para registro do espectro de frequência
RANGE	Seleciona a faixa de amplitude da vibração na unidade e norma de medida selecionada
UNIT	Seleciona a unidade de medida desejada: Aceleração ( $m/s^2$ ), Velocidade (mm/s) e Deslocamento ( $\bullet$ m). Esta chave também altera a faixa de medida seleciona pela chave RANGE
STAND	Seleciona a norma a ser usada para a medida: ISO 2372, True RMS ou valor 0 a pico. Quando esta chave estiver em ISO a unidade será sempre em velocidade.
CHANN	Seleciona o acelerômetro de entrada 1 ou 2.
STROB	Seleciona o modo de funcionamento da unidade estroboscópica: AUTO: A unidade estroboscópica será acionada em fase com o sinal de vibração filtrado. Esta função faz a sintonia automática do filtro com o sinal de vibração. FASE: A unidade estroboscópica será acionada em fase com o sinal de vibração filtrado e sintonizado manualmente, indicando a fase do vetor de desbalanceamento. OSC: A unidade estroboscópica será acionada por um oscilador interno ajustado manualmente, independente do sinal de vibração.
INDC	Executa a inversão das indicações do bargraph e display.
PLOT	Faz com que a frequência do filtro percorra a faixa selecionada linear e automaticamente, permitindo o registro do espectro de frequência.
FILTER	Liga ou desliga o filtro de frequência.
ON - OFF	Liga ou desliga o instrumento.

Tabela 6 - Configurações do Analisador de Vibração NK100.  
 Fonte: Manual NK100 TEKNIKAO.

#### 7.4.4. Inversor de Frequência

Um dos principais equipamentos para a execução deste trabalho é o inversor de frequência, o mesmo será responsável pela configuração da frequência de excitação da barra, onde a mesma tem relação direta com a amplitude da barra em vibração.

O inversor de frequência utilizado para configurar a frequência de excitação da barra será o Moeller DF51 322-075, este é indicado para controle de máquinas e equipamento indústrias com potência máxima ativa permitida de 0,75 kW, facilitando a configuração de operação de motores que só permitam essa configuração de forma mecânica, podendo alterar parâmetros como velocidade, tempo de partida, entre outros parâmetros.

O inversor opera com tensão nominal de 220V e será configurado para operar com frequência de 27,3 Hz. A Tabela 7 apresenta os dados técnicos do inversor de frequência selecionada, o DF51-322-075 e dos demais produtos da linha DF51-322.

#### Dados técnicos específicos do DF51-322

A tabela abaixo contém os dados técnicos específicos para a série de 230 V mono e trifásica (corrente, tensão, valores de torque etc.)

DF51-322-...		025	037	055	075	1K1	1K5	2K2	
Máxima potência ativa permitida do motor em kW; dados para motores assíncronos trifásicos de quatro pólos		0,25	0,37	0,55	0,75	1,1	1,5	2,2	
Máxima potência aparente permitida do motor em kVA	230 V	0,5	1,0	1,1	1,5	1,9	2,8	3,9	
	240 V	0,5	1,0	1,2	1,6	2,0	2,9	4,1	
Lado primário: Número de fases		Monofásico / trifásico							
Lado primário: Tensão nominal		180 V ~ -0 % a 264 V ~ +0 %, 47 a 63 Hz							
Lado secundário: Tensão nominal		Trifásico de 200 a 240 V ~ Corresponde à tensão nominal do lado primário Se a tensão do primário cair, a tensão do secundário também cai.							
Lado primário: Corrente nominal em A	Monofásico	3,1	5,8	6,7	9,0	11,2	16,0	22,5	
	Trifásico	1,8	3,4	3,9	5,2	6,5	9,3	13,0	
Lado secundário: Corrente nominal em A		1,6	2,6	3,0	4,0	5,0	7,1	10,0	
Torque durante a partida		100 % a partir de 6 Hz							
Torque de frenagem									
Com realimentação para os capacitores		100 % a $f \leq 50$ Hz					50 % a $f \leq 60$ Hz	20 % a $f \leq 60$ Hz	
Com frenagem CC		A frenagem ocorre em frequências abaixo da frequência mínima (frequência mínima, tempo de frenagem e torque de frenagem podem ser definidos pelo usuário)							
Sinais externos		Entradas digitais de controle programáveis como FWD e REV							
Ventilador		-	-	-	-	-	-	✓	

Tabela 7- Dados técnicos DF51-322.  
Fonte: Manual DF51 Moeller (2005).

#### 7.4.5. Mecanismo Excitador

Como mecanismo principal de excitação da barra, iremos utilizar um microventilador desbalanceado. O mesmo, devido ao desbalanceamento causado por acréscimo de peso em uma de suas pás, gerará uma força harmônica sobre a barra, o que a coloca em vibração.

O equipamento utilizado será o Microventilador Q80A3 de seis pás, fornecido pela Qualitas este é comumente utilizado para refrigeração de sistemas eletrônicos, onde a frequência de operação do mesmo é de 60Hz e a massa do equipamento é de aproximadamente 290g. Este será acionado através do inversor de frequência para a frequência determinada para o experimento de 27,3Hz.



Na Figura 21 estão apresentados os dados técnicos do microventilador, na Tabela 8 os dados de funcionamento e na Figura 22 as dimensões do mesmo.

<b>Dados Técnicos</b>	
Rigidez dielétrica: 1500VAC/1min.	
Vida útil estimada: $L_{10} = 20.000h$	
Protegido por impedância	
Isolação classe: 155°C	
Temperatura admissível de trabalho: $-10^{\circ}C$ a $+60^{\circ}C$	
Temperatura admissível de armazenagem: $-20^{\circ}C$ a $+70^{\circ}C$	
Variação de tensão admissível: $\pm 10\%$ do valor nominal por curto espaço de tempo.	

Figura 21 - Quadro de dados técnicos Microventilador Q80A3 (6P).  
Fonte: Datasheet Qualitas Q80A3 (6P).

Modelo	Tensão		Corrente			Potência Nominal (W)	Rotação $\pm 10\%$ (RPM)	Pressão Máx. (mm H <sub>2</sub> O)	Vazão Máx. $\pm 5\%$ (l/s)	Nível de Ruído (dBA)
	Nominal (V AC)	Mínima de Partida (V AC)	Nominal (mA)	de Partida (mA)	Máx. c/Rotor Bloqueado (mA)					
Q80A3(6P)	127/220	50/130	180/80	201/86	201/86	12	3050/2950	4,0	16	45

Tabela 8 - Dados de funcionamento Microventilador Q80A3 (6P).  
Fonte: Datasheet Qualitas Q80A3 (6P)

### DIMENSÕES

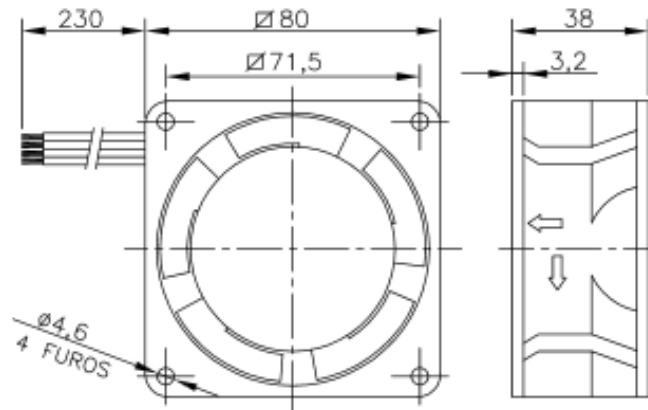


Figura 22 - Dimensões Microventilador Q80A3 (6P).  
Fonte: Datasheet Qualitas Q80A3 (6P)

## 7.5. PROGRAMAÇÃO

Para a programação foi utilizado o *software* MATLAB, fornecido pela MathWorks, o qual é utilizado para cálculo numérico, processamento de sinais, álgebra linear entre outras aplicações matemáticas, sendo uma combinação de outras linguagens de programação usualmente utilizadas como C, Java e Basic.

A programação do processamento de imagem foi subdividida em três partes, sendo a primeira delas a análise da imagem do vídeo e a identificação do primeiro sinal de vibração em relação ao tempo. Esta análise se baseia no deslocamento do centroide do ponto análise, calculando o centroide para cada frame gravado e obtendo a posição do mesmo em relação ao tempo de gravação. Esta análise inicial fornece dois gráficos, um de deslocamento em relação ao tempo e outro de deslocamento em relação às posições iniciais do ponto de observação.

Após o processamento do vídeo e o desenvolvimento de um gráfico de deslocamento em relação ao tempo, é aplicada a transformada de Fourier para decompor o sinal em suas respectivas componentes de frequência e amplitude e posterior à correção das componentes de frequência e amplitude em relação à frequência utilizada na lâmpada estroboscópica para que seja possível a interpretação correta dos pontos de vibração por uma câmera de até 30fps.

Com a aplicação da transformada de Fourier sobre o sinal obtido após o processamento de imagens e a devida correção em relação à fase aplicada pela lâmpada estroboscópica é possível obter a frequência e a amplitude do movimento. A amplitude apresentada pelo software ainda necessita de pós-processamento, devido a distância entre o plano vertical que a câmera se encontra e o plano do experimento. A amplitude ainda apresenta erro, este necessita ser corrigido pela relação de distância real por distância em pixels, encontrando assim o deslocamento real do sistema analisado. O pós processamento será realizado utilizando-se do *software* Microsoft Excel.

## 7.6. EXPERIMENTO

O experimento deste trabalho será realizado no Laboratório de Vibrações Mecânicas da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, campus Pato Branco, com a utilização da bancada de ensaio de vibrações em barra.

O experimento consiste na análise da frequência e amplitude de uma barra de aço que está sendo excitada pela força harmônica proveniente do desbalanceamento de um microventilador. Esta análise será realizada de duas formas. Uma por um ponto de cor vermelho localizado perpendicular ao sentido da vibração o qual será

monitorado e outra por um acelerômetro posicionado no mesmo sentido do deslocamento da barra.

A análise através do ponto é um dos objetivos deste trabalho, mas desenvolver uma metodologia capaz de analisar, com precisão conhecida, a frequência e a amplitude de uma barra em vibração, permitindo a utilização de câmeras de baixo custo, valor inferior a mil reais, em conjunto com o processamento de imagem realizado por um programa desenvolvido com o *software* MATLAB, vem paralelo ao mesmo.

A Figura 23 apresenta o posicionamento de execução entre o gabarito de posições e a barra de análise e a Figura 24 apresenta um diagrama de montagem do experimento, contendo o posicionamento do microventilador, do acelerômetro e do ponto de análise, assim como as distâncias de posicionamento dos mesmos.

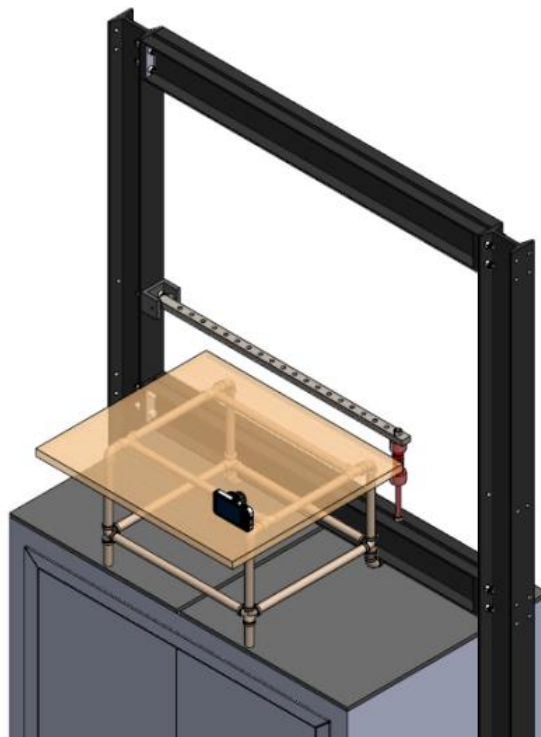


Figura 23 - Bancada de Experimento  
Fonte: Autoria própria

Para o posicionamento de cada equipamento sobre a barra de ensaio é necessário anteriormente posicionar o gabarito sobre a bancada, este exemplificado na Figura 18, e, posteriormente realizar o posicionamento da câmera em uma das quatro posições determinadas no diagrama da Figura 11, posição esta que varia de

acordo com cada teste determinado na fase de planejamento do experimento, conforme Tabela 2.

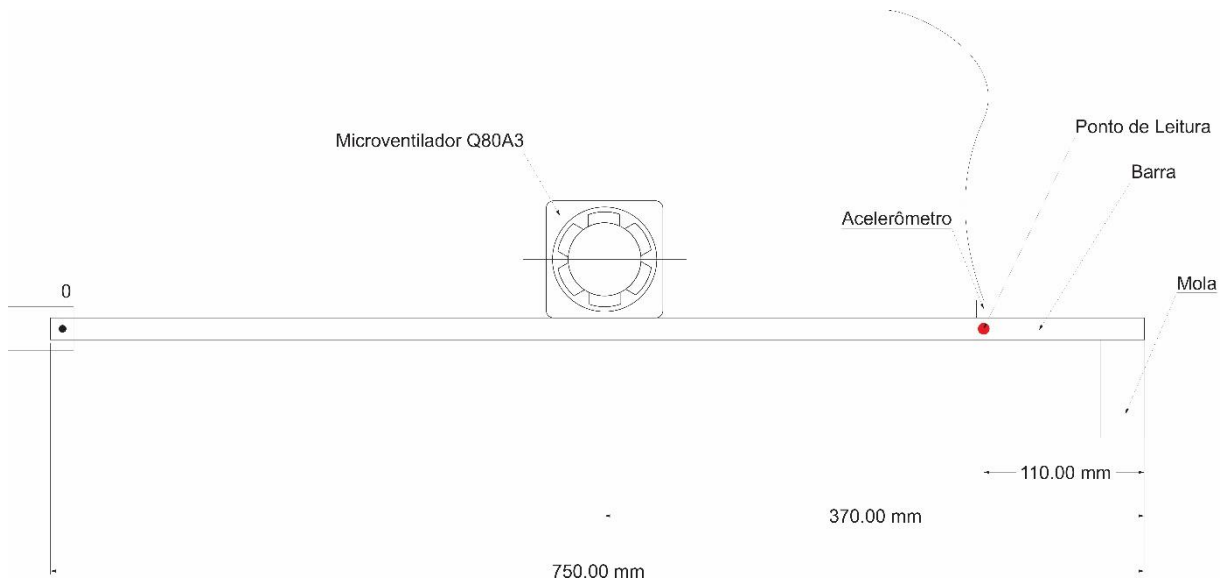


Figura 24 - Diagrama de posicionamento do experimento.  
Fonte: Autoria própria

Na Figura 24 é possível observar o posicionamento do microventilador em relação à ponta livre da barra que será analisada. Este microventilador, será o mecanismo de excitação utilizado para criar a força aplicada à barra que irá resultar na vibração do corpo estudado.

Para fazer com que o microventilador seja o mecanismo de excitação se faz necessário que o mesmo esteja com desbalanceamento rotativo, o que resultará em na geração de uma força centrífuga atuante sobre a barra.

Esse desbalanceamento rotativo é obtido através do acréscimo de uma massa conhecida de 1,8g sobre uma das seis pás do microventilador, em um raio de 30 mm entre a massa desbalanceada e o centro de giro do equipamento e com o microventilador configurado em 27,3Hz, resulta em uma força de 0,23N aplicada sobre a barra.

Com a incidência da força centrífuga sobre a barra a mesma entrará em ressonância e mantendo o funcionamento do microventilador, a barra manterá um sinal de vibração estável durante todo o processo de ensaio.

Devido a análise de vibrações ocorrer por captação de imagem, quanto maior for a resposta de amplitude da barra em relação a excitação, melhor será a captação

de imagem pela câmera e conseqüentemente menor será erro de leitura no momento do processamento das imagens.

O acelerômetro deve ser posicionado perpendicular ao ponto de leitura e no mesmo sentido do deslocamento da barra, assim, quando conectado ao módulo de análise de vibrações dB4 e o mesmo conectado ao *software* de análise, permitirá a captação do sinal de vibração em relação ao tempo e a gravação do mesmo. Possibilitando que este sinal possa ser analisado posteriormente juntamente com o processamento de imagem.

O ponto a ser medido varia de acordo com os parâmetros determinados anteriormente, como geometria do ponto e tamanho do ponto, portanto, este será alterado para cada teste a ser realizado, aumentando assim a confiabilidade do experimento criando maior variabilidade com a troca do ponto fixado na barra.

Com a definição do teste a ser realizado, fica definido a configuração dos parâmetros como, geometria, tamanho do ponto, frequência da lâmpada estroboscópica, ângulo e distância da câmera em relação ao ponto, e é possível realizar a coleta de dados do sistema em funcionamento.

Durante o experimento, um dos fatores que gera interferência do momento de filmagem são os reflexos emitidos pelos componentes metálicos do sistema, estes são provenientes da incidência da luz ambiente, que também causa interferência na projeção da luz da lâmpada estroboscópica sobre o ponto. Devido a isto, foi realizado o isolamento da barra e de seus componentes metálicos que sofrem com a emissão de reflexos e também, o desligamento da luz ambiente para a aquisição de dados, evitando assim interferências indevidas e aumentando a incidência de luz com frequência definida sobre o ponto.

O tempo de duração dos testes foi determinado como sendo aproximadamente de 20s, durante este tempo a câmera capta um vídeo e ao mesmo tempo o *software* de dBFA *Suite* realiza a gravação dos dados, garantido que para cada filme gravado com a câmera exista uma gravação do sinal captado pelo acelerômetro referente ao mesmo período.

O processamento de dados se inicia logo após a realização de todos os testes. Estes são processados pelo programa desenvolvido no MATLAB, que apresenta os valores para a frequência de vibração do sistema e a amplitude de movimento captada pela câmera de vídeo, em conjunto com cálculos realizados no Microsoft Excel será possível corrigir o erro de amplitude devido ao afastamento da câmera em relação ao plano real do movimento e permitir a comparação entre o erro real de leitura dos dados para o mesmo plano de movimento.

O pós-processamento de dados se faz necessário para buscar corrigir a amplitude do deslocamento, visto que a amplitude captada pela câmera de vídeo alterada em relação à amplitude real do movimento da barra, e, a determinação dos erros de experimentos realizados com a utilização de análise de vibrações por processamento de imagem comparado a análise utilizando um sensor de contato, nas seções 7.6.1, e 7.6.2 estão apresentadas as equações utilizadas para o desenvolvimento dos resultados.

#### 7.6.1. Determinar Erro de Amplitude de Movimento

Segundo HIBBELER, a velocidade da massa desbalanceada presente no cooler, a qual gera uma força harmônica, pode ser determinada através da equação 3, onde  $W$  é a velocidade angular e  $R$  o raio da massa analisada.

$$V = W * R \quad [03]$$

Ainda segundo HIBBELER, a força centrífuga que a massa desbalanceada exerce sobre o cooler e conseqüentemente sobre a barra é a energia cinética momentânea da massa e como a velocidade da massa é considerada constante, temos na equação abaixo a força resultante.

$$F_c = \frac{m * V^2}{R} \quad [04]$$

Substituindo a velocidade determinada na equação 3, a força centrífuga resultante para esse cooler é:

$$F_c = \frac{m * (W * R)^2}{R}$$

$$F_c = m * R * W^2 \quad [05]$$

O sistema barra-mola, forçado e não amortecido estudado neste trabalho é excitado por uma força harmônica, ou seja, a resultante da força centrífuga em relação a sua posição no tempo, conforme RAO.

$$F_0 = F_c * \cos(Wt)$$

$$F_0 = m * R * W^2 * \cos(Wt) \quad [06]$$

Para um sistema barra-mola, a equação de movimento da barra, desprezando amortecimento como já mencionado acima, é obtido através da Segunda Lei de Newton, onde resulta na equação [07], segundo RAO. Substituindo [06] em [07] encontra-se a equação de movimento da barra analisada neste trabalho de conclusão de curso.

$$0 = \frac{F_0 * L_{F0}}{I_0 * \sqrt{(Wn^2 - W^2)^2}} \quad [07]$$

$$0 = \frac{m * R * W^2 * L_{F0} * \cos(Wt)}{I_0 * \sqrt{(Wn^2 - W^2)^2}} \quad [08]$$

Já a equação de aceleração pode ser obtida através da integral dupla do seu movimento em função de t, segundo RAO. Sendo assim, a resultante da integral dupla em função de t, em [08] pode ser observada abaixo.

$$\ddot{0} = - \frac{m * R * W^4 * L_{F0} * \cos(Wt)}{I_0 * \sqrt{(Wn^2 - W^2)^2}} \quad [09]$$

Quando se iguala as equações de movimento [08] e aceleração [09], obtém-se a seguinte relação:

$$0 = \ddot{0}$$

$$\frac{\ddot{\theta}}{\theta} = \frac{\frac{m \cdot R \cdot W^4 \cdot L_{F0} \cdot \cos(Wt)}{I_0 \cdot \sqrt{(Wn^2 - W^2)^2}}}{\frac{m \cdot R \cdot W^2 \cdot L_{F0} \cdot \cos(Wt)}{I_0 \cdot \sqrt{(Wn^2 - W^2)^2}}}$$

$$\frac{\ddot{\theta}}{\theta} = -W^2 \quad [10]$$

Dessa forma, a equação abaixo permite a possibilidade de usar os dados obtidos pelo acelerômetro para encontrar o movimento da barra e posteriormente determinar o erro relativo da medida do software desenvolvido pela medida do acelerômetro, já que a equação 9 abaixo converte a aceleração dada pelo acelerômetro em movimento.

$$\theta = -\frac{\ddot{\theta}}{W^2} \quad [11]$$

O movimento do ponto capturado nas imagens e analisado pelo software depende diretamente da distância em que esse ponto foi posicionado em relação ao giro da barra, esse movimento é o movimento do ponto na imagem obtida e medido em unidades de comprimento pelo software.

Porém, a equação de deslocamento do ponto capturado precisa ser corrigida, fazendo com que o movimento na imagem digital esteja na mesma grandeza do movimento real. Isso só demonstra que a amplitude de movimento medida na imagem digital depende da distância em que o vídeo foi gravado.

$$C * O_{\text{vídeo}} \quad [12]$$

Onde C é uma forma de corrigir a amplitude de deslocamento na imagem digital e função da distância em que vídeo foi filmado, ou seja, essa função C é obtida de forma empírica, através dos resultados do software e a validade da linearidade dos resultados ao longo da distância analisada.



Sendo assim, a equação C, válida para a câmera utilizada neste trabalho é a seguinte:

$$C = \frac{0,000011475 + 0,0005353 * L_{\text{video}}}{0,4} \quad [13]$$

Assim, o erro percentual de medida em amplitude pode ser determinado, comparando o resultado obtido pela análise no software dos vídeos e os corrigindo através de [12] e [13], com o deslocamento medido no acelerômetro [11]. Como o acelerômetro e o ponto analisado estão posicionados com a mesma distância em relação ao ponto de giro da barra, pode-se igualar o deslocamento da barra obtido através do vídeo com o deslocamento medido pelo acelerômetro de forma direta, através da equação 14 abaixo.

$$\mathcal{E} = \frac{-\frac{\ddot{\theta}_{\text{acelerômetro}}}{W^2} - C * O_{\text{video}}}{-\frac{\ddot{\theta}_{\text{acelerômetro}}}{W^2}} \quad [14]$$

#### 7.6.2. Determinar Erro de Frequência

Segundo RAO, o período visualizado, ou seja, o período da equação de movimento dada pelo processamento de imagem em um sistema em fase é o inverso da diferença de frequência do estroboscópio e a excitação [15].

$$T_{\theta} = \frac{1}{f_{\text{estrobo}} - f_{\text{cooler}}} \quad [15]$$

Ainda segundo RAO, a frequência do estroboscópio e a frequência de excitação (cooler), seguem a relação abaixo.

$$f = \frac{1}{T} \quad [16]$$

Portanto, substituindo [16] em [15], obtém-se a equação do período visualizado na gravação do vídeo em função apenas de períodos, já que esses períodos podem ser obtidos pelas resultantes da equação de movimento mostradas na seção anterior.

$$T_{\theta} = \frac{1}{\frac{1}{T_{estrobo}} - \frac{1}{T_{cooler}}} \quad [17]$$

Como o objetivo é determinar a equação de frequência de excitação, pode-se isolar em [17] o período do cooler e dessa forma usar a relação [16] para determinar a frequência de excitação.

$$\frac{T_{\theta}}{T_{estrobo}} - \frac{T_{\theta}}{T_{cooler}} = 1$$

$$\frac{T_{\theta}}{T_{cooler}} = \frac{T_{\theta}}{T_{estrobo}} - 1$$

$$\frac{T_{cooler}}{T_{\theta}} = \frac{T_{estrobo}}{T_{\theta}} - 1$$

$$T_{cooler} = T_{estrobo} - T_{\theta} \quad [18]$$

Substituindo na relação [16], obtém-se a frequência do cooler.

$$f_{cooler} = \frac{1}{T_{estrobo} - T_{\theta}} \quad [19]$$

Já o erro relativo dessa medida é obtido comparando a frequência de excitação dada pelo processamento de imagens [19] diretamente com a frequência dada pelo acelerômetro.

$$\mathcal{E} = \frac{f_{cooler} - f_{acelerômetro}}{f_{cooler}} \quad [20]$$

## 8. ANÁLISES E RESULTADOS

### 8.1. FREQUÊNCIA

Os primeiros resultados encontrados neste trabalho apresentam a frequência encontrada após a análise por processamento de imagem, de acordo com os experimentos realizados seguindo a ordem apresentada nas Tabela 2, 3, 4 e 5, de acordo com a combinação dos parâmetros desenvolvida pela utilização do planejamento fatorial  $2^k$  e seguindo os limites de cada parâmetro apresentado na Tabela 1.

**Tabela 1 - Pontos Máximos e Mínimos dos Parâmetros.**

Parâmetros	Ponto Mínimo	Ponto Máximo	Indicador
<b>Geometria</b>	Geometria Simples	Geometria Complexa	Qualitativo
<b>Tamanho do Ponto</b>	Pequeno	Grande	Qualitativo
<b>Distância</b>	50mm	450mm	Quantitativo
<b>Ângulo</b>	0º	45º	Quantitativo
<b>Frequência da Lâmpada</b>	625RPM	664RPM	Quantitativo
<b>Valor Adotado</b>	-1	1	

Tabela 1 - Pontos máximos e mínimos dos parâmetros.  
Fonte: Autoria própria

As Tabela 9, 10, 11 e 12 apresentam os resultados encontrados seguindo o desenvolvimento da metodologia e do equacionamento apresentado na seção 7.6.2, para os determinados blocos de experimentos, com a análise comparativa da frequência encontrada utilizando-se um sensor de contato. Esta foi obtida através do acelerômetro, em comparação com a frequência obtida após o processamento de dados, estes obtidos através da análise por processamento de imagem, tendo como coluna de maior importância a que apresenta o erro percentual entre eles e na última coluna da tabela é apresentado um ranking dos resultados de erros encontrados.

**Tabela 9 - Resultados Frequência Bloco 1**

Bloco	Teste	Erro F. (geral)	Erro F. (ABS)	Erro F. (quad.)	Frequência Matlab	Frequência Acelerômetro	Ranking
1	1	1.365%	1.365%	0.019%	10.32	10.181	74
1	2	1.121%	1.121%	0.013%	10.28	10.166	11

<b>Bloco</b>	<b>Teste</b>	<b>Erro F. (geral)</b>	<b>Erro F. (ABS)</b>	<b>Erro F. (quad.)</b>	<b>Frequência Matlab</b>	<b>Frequencia Acelerômetro</b>	<b>Ranking</b>
1	4	1.286%	1.286%	0.017%	10.32	10.189	40
1	5	1.188%	1.188%	0.014%	10.31	10.189	18
1	6	1.647%	1.647%	0.027%	10.37	10.202	116
1	7	1.345%	1.345%	0.018%	10.32	10.183	69
1	8	1.306%	1.306%	0.017%	10.32	10.187	52
1	9	0.949%	0.949%	0.009%	10.32	10.223	2
1	10	7.259%	7.259%	0.527%	10.92	10.181	124
1	11	-4.903%	4.903%	0.240%	9.639	10.136	121
1	12	1.276%	1.276%	0.016%	10.32	10.190	37
1	13	1.650%	1.650%	0.027%	10.35	10.182	117
1	14	1.286%	1.286%	0.017%	10.32	10.189	40
1	15	1.445%	1.445%	0.021%	10.32	10.173	90
1	16	1.580%	1.580%	0.025%	10.35	10.189	114
1	17	1.306%	1.306%	0.017%	10.32	10.187	52
1	18	1.482%	1.482%	0.022%	10.34	10.189	98
1	19	1.441%	1.441%	0.021%	10.35	10.203	89
1	20	1.325%	1.325%	0.018%	10.32	10.185	58
1	21	1.391%	1.391%	0.019%	10.28	10.139	78
1	22	1.207%	1.207%	0.015%	10.31	10.187	23
1	23	1.530%	1.530%	0.023%	10.35	10.194	109
1	24	1.212%	1.212%	0.015%	10.27	10.147	24
1	25	1.188%	1.188%	0.014%	10.31	10.189	18
1	26	1.137%	1.137%	0.013%	10.32	10.204	12
1	27	1.678%	1.678%	0.028%	10.36	10.189	118

Bloco	Teste	Erro F. (geral)	Erro F. (ABS)	Erro F. (quad.)	Frequência Matlab	Frequencia Acelerômetro	Ranking
1	28	1.384%	1.384%	0.019%	10.33	10.189	77
1	29	1.038%	1.038%	0.011%	10.32	10.214	7
1	30	1.352%	1.352%	0.018%	10.27	10.133	71
1	31	8.007%	8.007%	0.641%	11.02	10.203	125
1	32	1.365%	1.365%	0.019%	10.32	10.181	74

Tabela 9 - Resultados Frequência Bloco 1  
Fonte: Autoria própria

**Tabela 10 - Resultados Frequência Bloco 2**

Bloco	Teste	Erro F. (geral)	Erro F. (ABS)	Erro F. (quad.)	Frequência Matlab	Frequencia Acelerômetro	Ranking
2	33	1.182%	1.182%	0.014%	10.27	10.150	17
2	34	1.409%	1.409%	0.020%	10.29	10.147	85
2	35	1.306%	1.306%	0.017%	10.32	10.187	52
2	36	1.325%	1.325%	0.018%	10.32	10.185	58
2	37	1.472%	1.472%	0.022%	10.34	10.190	96
2	38	1.179%	1.179%	0.014%	10.30	10.180	16
2	39	1.334%	1.334%	0.018%	10.33	10.194	62
2	40	1.515%	1.515%	0.023%	10.32	10.166	107
2	41	1.535%	1.535%	0.024%	10.32	10.164	110
2	42	1.449%	1.449%	0.021%	10.29	10.143	92
2	43	1.252%	1.252%	0.016%	10.27	10.143	35
2	44	1.286%	1.286%	0.017%	10.32	10.189	40
2	45	1.473%	1.473%	0.022%	10.33	10.180	97
2	46	1.236%	1.236%	0.015%	10.32	10.194	26

Bloco	Teste	Erro F. (geral)	Erro F. (ABS)	Erro F. (quad.)	Frequência Matlab	Frequencia Acelerômetro	Ranking
2	47	1.286%	1.286%	0.017%	10.32	10.189	40
2	48	1.404%	1.404%	0.020%	10.33	10.187	83
2	49	1.140%	1.140%	0.013%	10.29	10.174	13
2	50	1.432%	1.432%	0.021%	10.34	10.194	87
2	51	1.503%	1.503%	0.023%	10.33	10.177	105
2	52	1.276%	1.276%	0.016%	10.32	10.190	37
2	53	0.981%	0.981%	0.010%	10.29	10.190	3
2	54	1.395%	1.395%	0.019%	10.32	10.178	81
2	55	1.502%	1.502%	0.023%	10.34	10.187	104
2	56	1.325%	1.325%	0.018%	10.32	10.185	58
2	57	1.405%	1.405%	0.020%	10.32	10.177	84
2	58	1.276%	1.276%	0.016%	10.32	10.190	37
2	59	1.227%	1.227%	0.015%	10.31	10.185	25
2	60	1.392%	1.392%	0.019%	10.34	10.198	79
2	61	1.445%	1.445%	0.021%	10.32	10.173	90
2	62	1.286%	1.286%	0.017%	10.32	10.189	40
2	63	1.464%	1.464%	0.021%	10.33	10.181	93
2	64	1.365%	1.365%	0.019%	10.32	10.181	74

Tabela 10 - Resultados Frequência Bloco 2  
Fonte: Autoria própria

**Tabela 11 - Resultados Frequência Bloco 3**

Bloco	Teste	Erro F. (geral)	Erro F. (ABS)	Erro F. (quad.)	Frequência Matlab	Frequencia Acelerômetro	Ranking
3	65	1.306%	1.306%	0.017%	10.32	10.187	52

<b>Bloco</b>	<b>Teste</b>	<b>Erro F. (geral)</b>	<b>Erro F. (ABS)</b>	<b>Erro F. (quad.)</b>	<b>Frequência Matlab</b>	<b>Frequencia Acelerômetro</b>	<b>Ranking</b>
3	66	1.570%	1.570%	0.025%	10.35	10.190	112
3	67	1.306%	1.306%	0.017%	10.32	10.187	52
3	68	1.028%	1.028%	0.011%	10.32	10.215	5
3	69	1.334%	1.334%	0.018%	10.33	10.194	62
3	70	1.354%	1.354%	0.018%	10.33	10.192	73
3	71	1.255%	1.255%	0.016%	10.33	10.202	36
3	72	1.196%	1.196%	0.014%	10.32	10.198	21
3	73	1.097%	1.097%	0.012%	10.32	10.208	9
3	74	1.344%	1.344%	0.018%	10.33	10.193	68
3	75	1.236%	1.236%	0.015%	10.32	10.194	26
3	76	1.157%	1.157%	0.013%	10.32	10.202	14
3	77	1.522%	1.522%	0.023%	10.34	10.185	108
3	78	1.077%	1.077%	0.012%	10.32	10.210	8
3	79	1.236%	1.236%	0.015%	10.32	10.194	26
3	80	1.482%	1.482%	0.022%	10.34	10.189	98
3	81	1.037%	1.037%	0.011%	10.33	10.224	6
3	82	1.392%	1.392%	0.019%	10.34	10.198	79
3	83	1.542%	1.542%	0.024%	10.34	10.183	111
3	85	1.353%	1.353%	0.018%	10.34	10.202	72
3	86	1.325%	1.325%	0.018%	10.32	10.185	58
3	87	1.286%	1.286%	0.017%	10.32	10.189	40
3	88	1.176%	1.176%	0.014%	10.32	10.200	15
3	89	1.286%	1.286%	0.017%	10.32	10.189	40
3	90	1.334%	1.334%	0.018%	10.33	10.194	62

Bloco	Teste	Erro F. (geral)	Erro F. (ABS)	Erro F. (quad.)	Frequência Matlab	Frequencia Acelerômetro	Ranking
3	91	1.464%	1.464%	0.021%	10.33	10.181	93
3	92	1.503%	1.503%	0.023%	10.33	10.177	105
3	93	1.395%	1.395%	0.019%	10.32	10.178	81
3	94	1.306%	1.306%	0.017%	10.32	10.187	52
3	95	-5.925%	5.925%	0.351%	9.59	10.194	123
3	96	1.776%	1.776%	0.032%	10.37	10.189	120

Tabela 11 - Resultados Frequência Bloco 3  
Fonte: Autoria própria

**Tabela 12 - Resultados Frequência Bloco 4**

Bloco	Teste	Erro F. (geral)	Erro F. (ABS)	Erro F. (quad.)	Frequência Matlab	Frequencia Acelerômetro	Ranking
4	97	1.008%	1.008%	0.010%	10.32	10.217	4
4	98	1.421%	1.421%	0.020%	10.35	10.205	86
4	99	1.196%	1.196%	0.014%	10.32	10.198	21
4	100	1.236%	1.236%	0.015%	10.32	10.194	26
4	101	1.482%	1.482%	0.022%	10.34	10.189	98
4	102	1.334%	1.334%	0.018%	10.33	10.194	62
4	103	1.334%	1.334%	0.018%	10.33	10.194	62
4	104	-4.911%	4.911%	0.241%	9.681	10.181	122
4	105	1.286%	1.286%	0.017%	10.32	10.189	40
4	106	1.490%	1.490%	0.022%	10.35	10.198	102
4	107	0.929%	0.929%	0.009%	10.32	10.225	1
4	108	1.097%	1.097%	0.012%	10.32	10.208	9
4	109	1.572%	1.572%	0.025%	10.34	10.180	113



<b>Bloco</b>	<b>Teste</b>	<b>Erro F. (geral)</b>	<b>Erro F. (ABS)</b>	<b>Erro F. (quad.)</b>	<b>Frequência Matlab</b>	<b>Frequencia Acelerômetro</b>	<b>Ranking</b>
4	110	1.345%	1.345%	0.018%	10.32	10.183	69
4	111	1.286%	1.286%	0.017%	10.32	10.189	40
4	112	1.490%	1.490%	0.022%	10.35	10.198	102
4	113	1.464%	1.464%	0.021%	10.33	10.181	93
4	114	1.293%	1.293%	0.017%	10.34	10.208	51
4	115	1.432%	1.432%	0.021%	10.34	10.194	87
4	116	1.236%	1.236%	0.015%	10.32	10.194	26
4	117	1.482%	1.482%	0.022%	10.34	10.189	98
4	118	1.236%	1.236%	0.015%	10.32	10.194	26
4	119	1.188%	1.188%	0.014%	10.31	10.189	18
4	120	1.286%	1.286%	0.017%	10.32	10.189	40
4	121	1.705%	1.705%	0.029%	10.32	10.147	119
4	122	1.339%	1.339%	0.018%	10.29	10.154	67
4	123	1.236%	1.236%	0.015%	10.32	10.194	26
4	124	1.635%	1.635%	0.027%	10.32	10.154	115
4	125	1.286%	1.286%	0.017%	10.32	10.189	40
4	126	1.236%	1.236%	0.015%	10.32	10.194	26
4	127	8.036%	8.036%	0.646%	10.97	10.154	126
4	128	1.236%	1.236%	0.015%	10.32	10.194	26

Tabela 12 - Resultados Frequência Bloco 4  
Fonte: Autoria própria

Na análise dos 128 experimentos realizados, seguindo o planejamento de experimento desenvolvido, o menor erro encontrado foi no último bloco de testes, este sendo o bloco 4 e apresentado na Tabela 12, no teste de número 107 apresentou um erro de 0,93% da frequência encontrada utilizando a metodologia deste trabalho em comparação com a frequência realizada utilizando o acelerômetro, sendo também o

bloco que apresentou o maior erro encontrado, com um erro entre as metodologias de 8,04%, sendo apresentado no teste de número 127.

De acordo com a Figura 17, o acelerômetro em operação entre 1 a 8000 Hz pode apresentar 5% de variação do dado medido em relação ao dado real. Levando em consideração a sensibilidade de variação de 5% na leitura de dados pelo acelerômetro, selecionamos dentre os 128 testes realizados e excluindo 2 testes que foram desconsiderados devido a impossibilidade de realizar o processamento de dados, todos os que apresentaram erro com valor superior a 5% estão apresentados na Tabela 13.

**Tabela 13 - Testes Com Erro Superior a 5%**

BLOCO	TESTE	GEOMETRIA	TAMANHO	DISTANCIA	ÂNGULO	FREQUÊNCIA	ERRO
1	10	1	1	-1	-1	1	7.26%
1	31	1	-1	1	-1	1	8.01%
3	95	1	-1	1	-1	1	5.93%
4	127	1	-1	1	-1	1	8.04%

Tabela 13 - Testes com erro superior a 5%

Fonte: Autoria própria

Dos 126 testes considerados para análise, apenas 4 deles apresentam erro considerado muito elevado para ser considerado como confiável para experimento, que considera que 96,8% dos valores de frequência encontrados com esta metodologia de análise tem erro de leitura inferior a 5% em comparação com a leitura realizada pelo acelerômetro, exemplificando que nestes 96,8% dos testes os valores encontrados podem ser considerados para análise de equipamentos e estruturas com o mesmo percentual de erro considerado para os acelerômetros.

Para realizarmos uma análise mais minuciosa para o erro, se considerarmos incorretos os erros com percentual acima de 2%, além da lista já citada na tabela 13, somam-se mais dois testes, os de número 11 e 104, caracterizando como inutilizáveis 4,8% dos testes realizados, 95,2% dos testes possuem sensibilidade de leitura inferior a 2% em comparação com dados encontrados pelo acelerômetro, precisão considerada aceitável para instrumentos de medição e análise de vibrações.

Como é possível observar na Tabela 13, dentre os testes com sensibilidade maior que 5%, todos apresentaram configurações iguais em determinados parâmetros, como geometria do ponto, todos os testes estavam utilizando para análise a geometria complexa, que contendo 3 circunferências de diferentes tamanhos dispostas de forma que o centroide das mesmas forme uma circunferência de raio maior.

Os mesmos também apresentaram a configuração dos parâmetros ângulo e frequência de configuração da lâmpada estroboscópica em comum, utilizando como configuração de ângulo a posição mínima de 0° e com fase configurada no nível máximo.

Para os dois outros parâmetros, tamanho e distância, que somente o teste de número 10 apresentou configuração diferente dos demais, considerando que em 3 de 4 dos níveis configurados, o tamanho pequeno e a distância máxima, juntamente com os níveis em semelhantes determinados nos demais parâmetros, determinam que dos parâmetros utilizados e nas condições estudadas, são as piores configurações para a realização do experimento, oferecendo erro acima dos níveis aceitáveis para tais fins.

Já no teste de número 10, como o parâmetro tamanho e a distância são os opostos dos demais testes da Tabela 13, consideramos como erro devido ao operador no momento da realização do experimento, que também deve ser levado em consideração, pois o mesmo está presente em qualquer análise e experimento, tanto os realizados em laboratórios quanto em experimento em campo.

**Tabela 14 - Erro inferior a 1%**

BLOCO	TESTE	GEOMETRIA	TAMANHO	DISTANCIA	ÂNGULO	FREQUÊNCIA	ERRO
1	9	-1	1	1	-1	-1	0.95%
2	53	1	1	-1	1	1	0.98%
4	107	1	1	1	-1	-1	0.93%

Tabela 14 - Erro inferior a 1%  
 Fonte: Autoria própria

A Tabela 14 apresenta os melhores resultados para a comparação de frequência, sendo considerados todos os testes com sensibilidade menor que 1%, que compreendem 2,4% dos testes realizados possuem maior aleatoriedade na

configuração dos níveis escolhidos para cada parâmetro em relação aos considerados com sensibilidade maior que 5%, sendo que o único parâmetro em comum nos três testes selecionados é o referente ao tamanho do ponto, sendo selecionado o nível máximo.

Ainda com erro menor que 1%, a configuração que mais apresentou exatidão nos dados mensurados se diz respeito à utilização da geometria complexa, em longa distância, tamanho de ponto máximo, utilizando frequência da lâmpada estroboscópica configurada em seu nível mínimo e com ângulo também configurado em seu nível mínimo. O melhor resultado apresentado é formado por um experimento que utiliza uma geometria complexa para análise, com seu tamanho configurado em seu nível máximo, na distância máxima com ângulo de inclinação horizontal mínimo e com ângulo de fase formado pela lâmpada estroboscópica em seu nível mínimo.

Com os dados apresentados, 92,8% dos testes realizados apresentam erro nos valores calculados entre 1% e 2%, contendo 32 combinações diferentes formadas pelos parâmetros que norteiam este trabalho, confirmando a eficácia da metodologia desenvolvida para a análise de frequência em sistemas mecânicos.

## 8.2. AMPLITUDE

A amplitude de resposta da vibração do sistema mecânico que foi estudado neste trabalho apresenta maior complexidade de análise, devido a distância entre o plano vertical da câmera e o plano de deslocamento da vibração. Além disso, existe a necessidade da análise e do processamento realizado pelo MATLAB, o sinal e o resultado captado ainda precisa de um pós-processamento. Esse se deve na necessidade de considerar a distância entre os planos já citados para encontrar a amplitude real do deslocamento do sistema analisado. Novamente, os parâmetros analisados e os níveis máximo e mínimo de cada um é apresentado na Tabela 1.

**Tabela 1 - Pontos Máximos e Mínimos dos Parâmetros.**

Parâmetros	Ponto Mínimo	Ponto Máximo	Indicador
<b>Geometria</b>	Geometria Simples	Geometria Complexa	Qualitativo
<b>Tamanho do Ponto</b>	Pequeno	Grande	Qualitativo
<b>Distância</b>	50mm	450mm	Quantitativo
<b>Ângulo</b>	0º	45º	Quantitativo
<b>Frequência da Lâmpada</b>	625RPM	664RPM	Quantitativo

Parâmetros	Ponto Mínimo	Ponto Máximo	Indicador
Valor Adotado	-1	1	

Tabela 1 - Pontos máximos e mínimos dos parâmetros.  
 Fonte: Autoria própria

Os resultados encontrados estão apresentados nas tabelas

Bloco	Teste	$\theta$ (calc)	$\theta$ (vid)	$\ddot{\theta}$ (ace)	Erro A. (ABS)	Erro F. (quad.)	C	L(m)	Ranking
1	1	5.15	4.87	13.30	5.768%	0.333%	6.309E-04	0.45	96
1	2	4.34	4.15	11.17	4.565%	0.208%	6.309E-04	0.45	80
1	4	55.25	57.75	21.65	4.328%	0.187%	9.560E-05	0.05	78
1	5	5.90	6.00	15.26	1.665%	0.028%	6.309E-04	0.45	42
1	6	74.80	74.27	29.38	0.708%	0.005%	9.560E-05	0.05	22
1	7	4.43	4.66	11.45	4.872%	0.237%	6.309E-04	0.45	85
1	8	6.42	6.00	16.60	7.033%	0.495%	6.309E-04	0.45	103
1	9	12.21	9.43	31.79	29.510%	8.708%	6.309E-04	0.45	126
1	10	27.75	27.20	10.86	2.024%	0.041%	9.560E-05	0.05	47
1	11	4.05	3.55	10.38	14.222%	2.023%	6.309E-04	0.45	121
1	12	58.69	59.60	23.00	1.519%	0.023%	9.560E-05	0.05	39
1	13	7.69	7.72	19.86	0.378%	0.001%	6.309E-04	0.45	12
1	14	57.62	60.46	22.58	4.703%	0.221%	9.560E-05	0.05	82
1	15	47.29	47.54	18.47	0.530%	0.003%	9.560E-05	0.05	18
1	16	8.16	9.92	21.09	17.771%	3.158%	6.309E-04	0.45	124
1	17	53.52	54.87	20.96	2.468%	0.061%	9.560E-05	0.05	54
1	18	46.98	45.87	18.41	2.412%	0.058%	9.560E-05	0.05	53
1	19	48.26	50.14	18.96	3.744%	0.140%	9.560E-05	0.05	71
1	20	6.14	6.62	15.86	7.291%	0.532%	6.309E-04	0.45	104

Bloco	Teste	$\theta$ (calc)	$\theta$ (vid)	$\ddot{\theta}$ (ace)	Erro A. (ABS)	Erro F. (quad.)	C	L(m)	Ranking
1	21	23.79	21.71	9.23	9.581%	0.918%	9.560E-05	0.05	111
1	22	7.28	7.37	18.82	1.230%	0.015%	6.309E-04	0.45	34
1	23	6.87	6.83	17.79	0.657%	0.004%	6.309E-04	0.45	20
1	24	25.39	24.92	9.87	1.893%	0.036%	9.560E-05	0.05	45
1	25	43.07	45.18	16.88	4.667%	0.218%	9.560E-05	0.05	81
1	26	41.36	44.27	16.26	6.563%	0.431%	9.560E-05	0.05	101
1	27	45.66	45.79	17.89	0.285%	0.001%	9.560E-05	0.05	9
1	28	6.08	7.00	15.71	13.183%	1.738%	6.309E-04	0.45	119
1	29	7.13	6.75	18.53	5.670%	0.322%	6.309E-04	0.45	94
1	30	25.47	23.44	9.87	8.670%	0.752%	9.560E-05	0.05	110
1	31	6.96	6.62	18.04	5.100%	0.260%	6.309E-04	0.45	87
1	32	6.35	6.28	16.39	1.080%	0.012%	6.309E-04	0.45	28

**Tabela 15** 15, 16, 17 e 18. As tabelas são divididas em oito colunas, apresentando os dados com relação ao bloco de análise, ao número do teste, mas como dados principais para esta análise estão apresentados os dados referentes ao deslocamento do sistema medido no vídeo, o deslocamento calculado, a aceleração mensurada pelo acelerômetro, o C como fator de correção e o erro de amplitude mensurada em relação ao medido pelo acelerômetro, juntamente com a distância entre a câmera e o ponto. Todos estes estão apresentados na seção 7.6.1 deste trabalho.

**Tabela 15 - Resultado Amplitude Bloco 1**

Bloco	Teste	$\theta$ (calc)	$\theta$ (vid)	$\ddot{\theta}$ (ace)	Erro A. (ABS)	Erro F. (quad.)	C	L(m)	Ranking
1	1	5.15	4.87	13.30	5.768%	0.333%	6.309E-04	0.45	96
1	2	4.34	4.15	11.17	4.565%	0.208%	6.309E-04	0.45	80

Bloco	Teste	$\theta$ (calc)	$\theta$ (vid)	$\ddot{\theta}$ (ace)	Erro A. (ABS)	Erro F. (quad.)	C	L(m)	Ranking
1	4	55.25	57.75	21.65	4.328%	0.187%	9.560E-05	0.05	78
1	5	5.90	6.00	15.26	1.665%	0.028%	6.309E-04	0.45	42
1	6	74.80	74.27	29.38	0.708%	0.005%	9.560E-05	0.05	22
1	7	4.43	4.66	11.45	4.872%	0.237%	6.309E-04	0.45	85
1	8	6.42	6.00	16.60	7.033%	0.495%	6.309E-04	0.45	103
1	9	12.21	9.43	31.79	29.510%	8.708%	6.309E-04	0.45	126
1	10	27.75	27.20	10.86	2.024%	0.041%	9.560E-05	0.05	47
1	11	4.05	3.55	10.38	14.222%	2.023%	6.309E-04	0.45	121
1	12	58.69	59.60	23.00	1.519%	0.023%	9.560E-05	0.05	39
1	13	7.69	7.72	19.86	0.378%	0.001%	6.309E-04	0.45	12
1	14	57.62	60.46	22.58	4.703%	0.221%	9.560E-05	0.05	82
1	15	47.29	47.54	18.47	0.530%	0.003%	9.560E-05	0.05	18
1	16	8.16	9.92	21.09	17.771%	3.158%	6.309E-04	0.45	124
1	17	53.52	54.87	20.96	2.468%	0.061%	9.560E-05	0.05	54
1	18	46.98	45.87	18.41	2.412%	0.058%	9.560E-05	0.05	53
1	19	48.26	50.14	18.96	3.744%	0.140%	9.560E-05	0.05	71
1	20	6.14	6.62	15.86	7.291%	0.532%	6.309E-04	0.45	104
1	21	23.79	21.71	9.23	9.581%	0.918%	9.560E-05	0.05	111
1	22	7.28	7.37	18.82	1.230%	0.015%	6.309E-04	0.45	34
1	23	6.87	6.83	17.79	0.657%	0.004%	6.309E-04	0.45	20
1	24	25.39	24.92	9.87	1.893%	0.036%	9.560E-05	0.05	45
1	25	43.07	45.18	16.88	4.667%	0.218%	9.560E-05	0.05	81
1	26	41.36	44.27	16.26	6.563%	0.431%	9.560E-05	0.05	101
1	27	45.66	45.79	17.89	0.285%	0.001%	9.560E-05	0.05	9

Bloco	Teste	$\theta$ (calc)	$\theta$ (vid)	$\ddot{\theta}$ (ace)	Erro A. (ABS)	Erro F. (quad.)	C	L(m)	Ranking
1	28	6.08	7.00	15.71	13.183%	1.738%	6.309E-04	0.45	119
1	29	7.13	6.75	18.53	5.670%	0.322%	6.309E-04	0.45	94
1	30	25.47	23.44	9.87	8.670%	0.752%	9.560E-05	0.05	110
1	31	6.96	6.62	18.04	5.100%	0.260%	6.309E-04	0.45	87
1	32	6.35	6.28	16.39	1.080%	0.012%	6.309E-04	0.45	28

Tabela 15 - Resultado Amplitude Bloco 1  
Fonte: Autoria própria

**Tabela 16 - Resultado Amplitude Bloco 2**

Bloco	Teste	$\theta$ (calc)	$\theta$ (vid)	$\ddot{\theta}$ (ace)	Erro A. (ABS)	Erro F. (quad.)	C	L(m)	Ranking
2	33	4.07	3.85	10.44	5.638%	0.318%	6.309E-04	0.45	93
2	34	4.30	4.16	11.03	3.373%	0.114%	6.309E-04	0.45	65
2	35	35.81	35.00	14.03	2.312%	0.053%	9.560E-05	0.05	49
2	36	55.33	54.62	21.66	1.299%	0.017%	9.560E-05	0.05	35
2	37	5.40	4.80	13.96	12.422%	1.543%	6.309E-04	0.45	118
2	38	32.13	33.05	12.57	2.790%	0.078%	9.560E-05	0.05	58
2	39	4.46	4.93	11.54	9.594%	0.920%	6.309E-04	0.45	112
2	40	4.94	4.75	12.71	3.935%	0.155%	6.309E-04	0.45	74
2	41	5.57	5.82	14.34	4.255%	0.181%	6.309E-04	0.45	76
2	42	29.06	30.19	11.28	3.748%	0.140%	9.560E-05	0.05	72
2	43	4.31	4.20	11.05	2.674%	0.071%	6.309E-04	0.45	57
2	44	33.92	34.60	13.29	1.975%	0.039%	9.560E-05	0.05	46
2	45	7.47	7.22	19.27	3.423%	0.117%	6.309E-04	0.45	66
2	46	34.75	38.55	13.63	9.850%	0.970%	9.560E-05	0.05	114
2	47	47.75	47.00	18.71	1.589%	0.025%	9.560E-05	0.05	41



Bloco	Teste	$\theta$ (calc)	$\theta$ (vid)	$\ddot{\theta}$ (ace)	Erro A. (ABS)	Erro F. (quad.)	C	L(m)	Ranking
2	48	5.09	5.12	13.16	0.527%	0.003%	6.309E-04	0.45	17
2	49	33.06	34.93	12.92	5.356%	0.287%	9.560E-05	0.05	89
2	50	42.13	42.61	16.52	1.123%	0.013%	9.560E-05	0.05	30
2	51	31.29	32.00	12.23	2.227%	0.050%	9.560E-05	0.05	48
2	52	5.18	5.80	13.40	10.674%	1.139%	6.309E-04	0.45	116
2	53	28.98	29.07	11.36	0.301%	0.001%	9.560E-05	0.05	10
2	54	4.74	5.13	12.23	7.579%	0.574%	6.309E-04	0.45	106
2	55	4.74	4.79	12.25	1.097%	0.012%	6.309E-04	0.45	29
2	56	28.79	30.22	11.27	4.736%	0.224%	9.560E-05	0.05	83
2	57	35.01	33.84	13.69	3.471%	0.121%	9.560E-05	0.05	68
2	58	31.87	32.01	12.49	0.434%	0.002%	9.560E-05	0.05	14
2	59	39.08	38.87	15.30	0.546%	0.003%	9.560E-05	0.05	19
2	60	4.64	4.38	12.02	5.927%	0.351%	6.309E-04	0.45	97
2	61	5.61	6.50	14.47	13.647%	1.862%	6.309E-04	0.45	120
2	62	29.68	29.62	11.63	0.202%	0.000%	9.560E-05	0.05	7
2	63	5.41	5.39	13.98	0.430%	0.002%	6.309E-04	0.45	13
2	64	5.31	5.22	13.72	1.816%	0.033%	6.309E-04	0.45	44

Tabela 16 - Resultado Amplitude Bloco 2  
Fonte: Autoria própria

**Tabela 17 - Resultado Amplitude Bloco 3**

Bloco	Teste	$\theta$ (calc)	$\theta$ (vid)	$\ddot{\theta}$ (ace)	Erro A. (ABS)	Erro F. (quad.)	C	L(m)	Ranking
3	65	8.13	7.71	21.00	5.384%	0.290%	6.309E-04	0.45	90
3	66	7.08	7.27	18.31	2.632%	0.069%	6.309E-04	0.45	56
3	67	50.38	50.37	19.73	0.026%	0.000%	9.560E-05	0.05	2

Bloco	Teste	$\theta$ (calc)	$\theta$ (vid)	$\ddot{\theta}$ (ace)	Erro A. (ABS)	Erro F. (quad.)	C	L(m)	Ranking
3	68	50.90	50.11	20.05	1.580%	0.025%	9.560E-05	0.05	40
3	69	6.69	6.50	17.31	2.866%	0.082%	6.309E-04	0.45	60
3	70	41.71	41.16	16.35	1.347%	0.018%	9.560E-05	0.05	37
3	71	6.82	6.42	17.67	6.184%	0.382%	6.309E-04	0.45	98
3	72	6.16	6.67	15.95	7.711%	0.595%	6.309E-04	0.45	107
3	73	9.14	8.85	23.73	3.313%	0.110%	6.309E-04	0.45	63
3	74	43.81	43.60	17.18	0.488%	0.002%	9.560E-05	0.05	15
3	75	6.30	6.00	16.30	4.961%	0.246%	6.309E-04	0.45	86
3	76	59.48	58.11	23.37	2.364%	0.056%	9.560E-05	0.05	50
3	77	7.07	6.66	18.27	6.192%	0.383%	6.309E-04	0.45	99
3	78	56.21	54.01	22.11	4.065%	0.165%	9.560E-05	0.05	75
3	79	46.28	44.70	18.15	3.529%	0.125%	9.560E-05	0.05	69
3	80	7.68	7.63	19.86	0.668%	0.004%	6.309E-04	0.45	21
3	81	48.96	48.37	19.32	1.224%	0.015%	9.560E-05	0.05	33
3	82	40.30	39.97	15.82	0.819%	0.007%	9.560E-05	0.05	25
3	83	43.15	43.36	16.89	0.496%	0.002%	9.560E-05	0.05	16
3	85	39.06	38.16	15.35	2.369%	0.056%	9.560E-05	0.05	51
3	86	6.53	6.37	16.88	2.557%	0.065%	6.309E-04	0.45	55
3	87	6.00	6.35	15.52	5.496%	0.302%	6.309E-04	0.45	91
3	88	38.62	37.97	15.16	1.701%	0.029%	9.560E-05	0.05	43
3	89	39.89	38.79	15.63	2.839%	0.081%	9.560E-05	0.05	59
3	90	35.73	36.15	14.01	1.164%	0.014%	9.560E-05	0.05	31
3	91	40.44	40.93	15.82	1.192%	0.014%	9.560E-05	0.05	32
3	92	5.41	5.00	13.95	8.162%	0.666%	6.309E-04	0.45	109

Bloco	Teste	$\theta$ (calc)	$\theta$ (vid)	$\ddot{\theta}$ (ace)	Erro A. (ABS)	Erro F. (quad.)	C	L(m)	Ranking
3	93	5.55	6.00	14.32	7.505%	0.563%	6.309E-04	0.45	105
3	94	34.72	41.05	13.60	15.417%	2.377%	9.560E-05	0.05	123
3	95	5.29	6.19	13.69	14.527%	2.110%	6.309E-04	0.45	122
3	96	4.96	5.30	12.83	6.358%	0.404%	6.309E-04	0.45	100

Tabela 17 - Resultado Amplitude Bloco 3  
Fonte: Autoria própria

**Tabela 18 - Resultado Amplitude Bloco 4**

Bloco	Teste	$\theta$ (calc)	$\theta$ (vid)	$\ddot{\theta}$ (ace)	Erro A. (ABS)	Erro F. (quad.)	C	L(m)	Ranking
4	97	10.75	10.64	27.95	1.017%	0.010%	6.309E-04	0.45	27
4	98	9.71	10.20	25.20	4.768%	0.227%	6.309E-04	0.45	84
4	99	42.61	45.67	16.72	6.712%	0.451%	9.560E-05	0.05	102
4	100	54.53	54.64	21.39	0.192%	0.000%	9.560E-05	0.05	6
4	101	6.29	7.00	16.27	10.117%	1.023%	6.309E-04	0.45	115
4	102	36.46	36.17	14.30	0.802%	0.006%	9.560E-05	0.05	24
4	103	9.59	9.66	24.82	0.720%	0.005%	6.309E-04	0.45	23
4	104	5.68	4.50	14.65	26.120%	6.822%	6.309E-04	0.45	125
4	105	9.05	9.04	23.39	0.038%	0.000%	6.309E-04	0.45	3
4	106	56.31	56.78	22.10	0.827%	0.007%	9.560E-05	0.05	26
4	107	8.59	8.62	22.37	0.367%	0.001%	6.309E-04	0.45	11
4	108	49.89	47.85	19.62	4.277%	0.183%	9.560E-05	0.05	77
4	109	7.61	7.88	19.63	3.459%	0.120%	6.309E-04	0.45	67
4	110	46.56	45.96	18.22	1.304%	0.017%	9.560E-05	0.05	36
4	111	45.70	43.99	17.90	3.869%	0.150%	9.560E-05	0.05	73
4	112	7.07	6.55	18.32	7.987%	0.638%	6.309E-04	0.45	108
4	113	43.36	42.35	16.96	2.400%	0.058%	9.560E-05	0.05	52

Bloco	Teste	$\theta$ (calc)	$\theta$ (vid)	$\ddot{\theta}$ (ace)	Erro A. (ABS)	Erro F. (quad.)	C	L(m)	Ranking
4	114	41.36	43.24	16.27	4.360%	0.190%	9.560E-05	0.05	79
4	115	41.01	40.98	16.09	0.076%	0.000%	9.560E-05	0.05	4
4	116	4.78	5.39	12.38	11.236%	1.262%	6.309E-04	0.45	117
4	117	52.82	50.02	20.69	5.581%	0.311%	9.560E-05	0.05	92
4	118	6.12	6.31	15.85	2.917%	0.085%	6.309E-04	0.45	62
4	119	5.44	6.02	14.06	9.669%	0.935%	6.309E-04	0.45	113
4	120	52.27	50.44	20.48	3.648%	0.133%	9.560E-05	0.05	70
4	121	29.42	29.35	11.43	0.270%	0.001%	9.560E-05	0.05	8
4	122	25.38	24.56	9.88	3.326%	0.111%	9.560E-05	0.05	64
4	123	41.63	41.06	16.33	1.378%	0.019%	9.560E-05	0.05	38
4	124	4.31	4.55	11.07	5.224%	0.273%	6.309E-04	0.45	88
4	125	5.91	5.90	15.27	0.100%	0.000%	6.309E-04	0.45	5
4	126	49.33	46.66	19.35	5.712%	0.326%	9.560E-05	0.05	95
4	127	5.07	5.08	13.03	0.012%	0.000%	6.309E-04	0.45	1
4	128	5.43	5.59	14.06	2.885%	0.083%	6.309E-04	0.45	61

Tabela 18 - Resultado Amplitude Bloco 4  
Fonte: Autoria própria

Em uma análise geral dos resultados obtidos para amplitude, é possível observar que os erros encontrados em relação aos dados obtidos através do acelerômetro são relativamente superiores aos encontrados no comparativo dos resultados de frequência, sendo que o maior erro de amplitude encontrado é um erro de 29,51% em relação ao dado pelo acelerômetro, que é encontrado no teste de número 9 realizado durante o primeiro bloco de testes.

Como menor erro e melhor resultado obtido para a análise de amplitude, temos um erro de 0,12% no comparativo de dados. Este é encontrado no quarto bloco de testes sendo obtido no teste de número 127, o que demonstra que apesar de os resultados obtidos para amplitude serem os com maior incidência de erro e com

grande variação nos valores, os mesmo são também os que obtiveram o menor erro em relação a todos os resultados encontrados. A Tabela 19 apresenta os níveis configurados para a obtenção de tais dados.

**Tabela 19 - Erro Máximo e Mínimo Para Amplitude.**

BLOCO	TESTE	GEOMETRIA	TAMANHO	DISTANCIA	ÂNGULO	FREQUÊNCIA	ERRO	
1	9	-1	1	1	-1	-1	29.51%	MAIOR
4	127	1	-1	1	-1	1	0.12%	MENOR

Tabela 19 - Erro máximo e mínimo para amplitude.  
Fonte: Autoria própria

O valor de sensibilidade aceitável será definido como equivalente a 10% para uma primeira análise dos resultados de variação entre os dados medidos pelo acelerômetro e os encontrados utilizando esta metodologia de análise.

Como apresentado na

Bloco	Teste	Geometria	Tamanho	Distância	Ângulo	Frequência	Erro A. (ABS)	Ranking
1	9	-1	1	1	-1	-1	29.510%	126
1	11	1	1	1	-1	-1	14.222%	121
1	16	-1	1	1	-1	1	17.771%	124
1	28	-1	-1	1	1	1	13.183%	119
2	37	-1	-1	1	-1	1	12.422%	118
2	52	-1	-1	1	-1	-1	10.674%	116
2	61	1	-1	1	-1	-1	13.647%	120
3	94	1	1	-1	1	-1	15.417%	123
3	95	1	-1	1	-1	1	14.527%	122
4	101	-1	-1	1	-1	1	10.117%	115
4	104	-1	-1	1	1	-1	26.120%	125
4	116	-1	-1	1	-1	-1	11.236%	117

**Tabela 20**, para uma análise de erro considerando como aceitáveis somente valores inferiores a 10% e é possível observar que 9,52% dos resultados obtidos apresentam erro superior a isso, considerando como resultados não aceitáveis para utilização na avaliação de equipamentos e sistemas.

De acordo com a

Bloco	Teste	Geometria	Tamanho	Distância	Ângulo	Frequência	Erro A. (ABS)	Ranking
1	9	-1	1	1	-1	-1	29.510%	126
1	11	1	1	1	-1	-1	14.222%	121
1	16	-1	1	1	-1	1	17.771%	124
1	28	-1	-1	1	1	1	13.183%	119
2	37	-1	-1	1	-1	1	12.422%	118
2	52	-1	-1	1	-1	-1	10.674%	116
2	61	1	-1	1	-1	-1	13.647%	120
3	94	1	1	-1	1	-1	15.417%	123
3	95	1	-1	1	-1	1	14.527%	122
4	101	-1	-1	1	-1	1	10.117%	115
4	104	-1	-1	1	1	-1	26.120%	125
4	116	-1	-1	1	-1	-1	11.236%	117

**Tabela 20**, o parâmetro que apresentou mesmo nível configurado em 91,6% dos testes com erro superior a 10% foram obtidos com análises realizados em experimentos configurados na distância máxima dos experimentos, considerando também que em 75% destes resultados a câmera estava em um plano reto em relação ao sistema vibrante.

Os demais parâmetros analisados apresentaram as duas configurações, máxima e mínima, apresentando proporções mais próximas nos testes com erro superior a 10%. Nos parâmetros de geometria e tamanho do ponto, 33,3% dos testes com erro superior a 10% apresentaram geometria complexa e tamanho grande.

Tal erro é obtido devido a dificuldade no processamento e análise da amplitude e no desenvolvimento das interações matemáticas que possibilitam a comparação dos resultados obtidos neste metodologia e nos obtidos convencionalmente. Esse erro é também considerado devido aos parâmetros configurados estarem em situações máximas ou mínimas que dificultam a utilização desta metodologia em tais configurações e aplicações.

**Tabela 20 - Erro Apresentados Superiores a 10%.**

Bloco	Teste	Geometria	Tamanho	Distância	Ângulo	Frequência	Erro A. (ABS)	Ranking
1	9	-1	1	1	-1	-1	29.510%	126
1	11	1	1	1	-1	-1	14.222%	121
1	16	-1	1	1	-1	1	17.771%	124

Bloco	Teste	Geometria	Tamanho	Distância	Ângulo	Frequência	Erro A. (ABS)	Ranking
1	28	-1	-1	1	1	1	13.183%	119
2	37	-1	-1	1	-1	1	12.422%	118
2	52	-1	-1	1	-1	-1	10.674%	116
2	61	1	-1	1	-1	-1	13.647%	120
3	94	1	1	-1	1	-1	15.417%	123
3	95	1	-1	1	-1	1	14.527%	122
4	101	-1	-1	1	-1	1	10.117%	115
4	104	-1	-1	1	1	-1	26.120%	125
4	116	-1	-1	1	-1	-1	11.236%	117

Tabela 20 - Erro apresentados superiores a 10%.

Fonte: Autoria própria

Para uma análise mais profunda dos resultados e selecionando neste momento resultados com sensibilidade no erro superior a 5%, erro este que opera como limite máximo do valor aceitável para garantir confiabilidade em medições e análises de vibrações, a tabela 21 apresenta os resultados obtidos em que o erro encontrado está situado no intervalo entre 5% e 10% e de acordo com a mesma, 28 testes apresentam resultados dentro da faixa selecionada, demonstrando que 22,2% dos testes executados compreendem erro inferior a 10% porém superior a 5%.

**Tabela 21 - Erro Compreendendo Intervalo Entre 5% E 10%.**

Bloco	Teste	Geometria	Tamanho	Distância	Ângulo	Frequência	Erro A. (ABS)	Ranking
1	1	1	1	1	1	-1	5.768%	96
1	8	-1	-1	1	1	-1	7.033%	103
1	20	-1	-1	1	-1	-1	7.291%	104
1	21	1	1	-1	1	1	9.581%	111
1	26	-1	-1	-1	-1	1	6.563%	101
1	29	1	-1	1	-1	-1	5.670%	94
1	30	1	1	-1	1	-1	8.670%	110
1	31	1	-1	1	-1	1	5.100%	87
2	33	1	1	1	1	-1	5.638%	93
2	39	1	1	1	-1	1	9.594%	112
2	46	-1	1	-1	1	-1	9.850%	114
2	49	-1	1	-1	-1	1	5.356%	89
2	54	-1	1	1	1	-1	7.579%	106
2	60	-1	-1	1	1	1	5.927%	97
3	65	1	1	1	1	-1	5.384%	90
3	71	1	1	1	-1	1	6.184%	98
3	72	-1	-1	1	1	-1	7.711%	107

Bloco	Teste	Geometria	Tamanho	Distância	Ângulo	Frequência	Erro A. (ABS)	Ranking
3	77	1	-1	1	1	1	6.192%	99
3	87	-1	1	1	1	1	5.496%	91
3	92	-1	-1	1	1	1	8.162%	109
3	93	1	-1	1	-1	-1	7.505%	105
3	96	1	-1	1	1	-1	6.358%	100
4	99	-1	-1	-1	1	-1	6.712%	102
4	112	-1	1	1	-1	1	7.987%	108
4	117	1	1	-1	1	1	5.581%	92
4	119	-1	1	1	1	1	9.669%	113
4	124	-1	-1	1	1	1	5.224%	88
4	126	1	1	-1	1	-1	5.712%	95

Tabela 21 - Erro compreendendo intervalo entre 5% e 10%.

Fonte: Autoria própria

Dentre os testes analisados, 40 destes apresentaram resultados com erro acima de 5%, o que coloca as combinações dos níveis configurados nos parâmetros de tais testes acima da sensibilidade do acelerômetro. Conferindo como resultado principal para a análise de amplitude, seguindo esta metodologia que 31,74% dos testes realizados apresentaram erros superiores a sensibilidade do acelerômetro.

Na combinação de parâmetros que apresentaram os piores resultados na análise de amplitude, está a utilização de geometria simples combinada com grandes distâncias, os outros parâmetros estão distribuídos de forma aproximadamente igual, em todos os 40 testes citados. Isso indica que a utilização de geometria de ponto simples e a longas distância são os parâmetros mais propensos a apresentarem elevados erros.

Porém, como apresentado na

Bloco	Teste	Geometria	Tamanho	Distância	Ângulo	Frequência	Erro A. (ABS)	Ranking
1	6	-1	-1	-1	1	1	0.708%	22
1	13	1	-1	1	1	1	0.378%	12
1	15	1	-1	-1	1	-1	0.530%	18
1	23	-1	1	1	1	1	0.657%	20
1	27	1	-1	-1	-1	1	0.285%	9
2	48	-1	1	1	-1	1	0.527%	17
2	53	1	1	-1	1	1	0.301%	10
2	58	-1	-1	-1	-1	1	0.434%	14
2	59	1	-1	-1	-1	1	0.546%	19



2	62	1	1	-1	1	-1	0.202%	7
2	63	1	-1	1	-1	1	0.430%	13
3	67	-1	-1	-1	1	-1	0.026%	2
3	74	1	1	-1	-1	1	0.488%	15
3	80	-1	1	1	-1	1	0.668%	21
3	82	1	-1	-1	1	1	0.819%	25
3	83	-1	1	-1	1	1	0.496%	16
4	100	1	-1	-1	-1	-1	0.192%	6
4	102	-1	-1	-1	1	1	0.802%	24
4	103	1	1	1	-1	1	0.720%	23
4	105	-1	1	1	-1	-1	0.038%	3
4	106	1	1	-1	-1	1	0.827%	26
4	107	1	1	1	-1	-1	0.367%	11
4	115	-1	1	-1	1	1	0.076%	4
4	121	-1	-1	-1	-1	-1	0.270%	8
4	125	1	-1	1	-1	-1	0.100%	5
4	127	1	-1	1	-1	1	0.012%	1

**Tabela 22**, 26 testes, que representam 20,6% dos resultados processados para os erros de amplitude apresentaram erro inferior a 1%, conferindo para a situação aplicada e para os níveis máximos e mínimos adotados em cada parâmetro, alta confiabilidade de resultado para aplicação nas condições analisadas.

O parâmetro distância definido como mínimo foi encontrado em 61,54% dos 26 testes citados. Já o parâmetro ângulo, em 88,1% estavam em seu nível máximo. Parâmetros como frequência de operação da lâmpada, tamanho do ponto e geometria não obtiveram uma distribuição significativa para conclusões.

**Tabela 22 - Resultados De Amplitude Com Erro Inferior A 1%**

Bloco	Teste	Geometria	Tamanho	Distância	Ângulo	Frequência	Erro A. (ABS)	Ranking
1	6	-1	-1	-1	1	1	0.708%	22
1	13	1	-1	1	1	1	0.378%	12
1	15	1	-1	-1	1	-1	0.530%	18
1	23	-1	1	1	1	1	0.657%	20
1	27	1	-1	-1	-1	1	0.285%	9
2	48	-1	1	1	-1	1	0.527%	17
2	53	1	1	-1	1	1	0.301%	10
2	58	-1	-1	-1	-1	1	0.434%	14
2	59	1	-1	-1	-1	1	0.546%	19
2	62	1	1	-1	1	-1	0.202%	7

2	63	1	-1	1	-1	1	0.430%	13
3	67	-1	-1	-1	1	-1	0.026%	2
3	74	1	1	-1	-1	1	0.488%	15
3	80	-1	1	1	-1	1	0.668%	21
3	82	1	-1	-1	1	1	0.819%	25
3	83	-1	1	-1	1	1	0.496%	16
4	100	1	-1	-1	-1	-1	0.192%	6
4	102	-1	-1	-1	1	1	0.802%	24
4	103	1	1	1	-1	1	0.720%	23
4	105	-1	1	1	-1	-1	0.038%	3
4	106	1	1	-1	-1	1	0.827%	26
4	107	1	1	1	-1	-1	0.367%	11
4	115	-1	1	-1	1	1	0.076%	4
4	121	-1	-1	-1	-1	-1	0.270%	8
4	125	1	-1	1	-1	-1	0.100%	5
4	127	1	-1	1	-1	1	0.012%	1

Tabela 22 - Resultados de amplitude com erro inferior a 1%  
Fonte: Autoria própria

Entre a melhor configuração para a análise da amplitude de um sistema em vibração, estão a utilização de distâncias curtas entre o objeto e a câmera, com fase formada pela frequência da lâmpada estroboscópica em maior valor, utilizando tamanhos pequenos do ponto para análise e geometrias mais complexas, quanto ao ângulo de inclinação entre ponto e câmera, a utilização de inclinação para curtas distâncias apresenta melhores resultados e menores erros.

Um dos fatores de grande importância e que é difícil de ser mensurar, é o erro em relação a operação e posicionamento dos equipamentos e acessórios, denominado de erro de operador, este influencia na alteração dos resultados finais do experimento mas é difícil de ser mensurada, e deve ser considerado pois ele está sempre presente, principalmente em operações de mensuração e análise em campo.

Outro fator de importância a ser considerado, é que devido à câmera utilizada ser de foco automático, a mesma em determinadas ocasiões perdia o foco do ponto durante a operação, alterando o focagem da mesma e gerando erro na análise posterior do vídeo, para estudos furtos se vê a necessidade de utilização de uma câmera com foco manual, o que permite a definição e regulagem do mesmo evitando que ele se altere durante a execução do experimento, garantindo maior confiabilidade ao experimento e aos resultados do mesmo.

### 8.3. ANÁLISE ESTATÍSTICA

#### 8.3.1. Análise Estatística Sobre O Erro De Frequência

Utilizando um critério de múltiplos fatores para a análise estatística dos resultados, com um nível de iterações e confiabilidade de 95%, pode-se determinar quais os parâmetros influenciam de forma direta a matriz resposta desejada, no caso, o erro de frequência.

#### Análise da Variância para o Erro de Frequência - MANOVA

<i>Origem</i>	<i>Soma dos Quadrados</i>	<i>Df</i>	<i>Média Quadrática</i>	<i>F - Pro- porção</i>	<i>P-Valor</i>
<b>PRINCIPAIS EFEITOS</b>					
<b>A: Bloco</b>	0,00326347	3	0,000108782	0,52	0,6687
<b>B: Geometria</b>	0,000124479	1	0,000124479	0,60	0,4416
<b>C: Tamanho</b>	0,00000743395	1	0,00000743395	0,04	0,8507
<b>D: Distância</b>	0,0000876187	1	0,0000876187	0,42	0,5184
<b>E: Ângulo</b>	0,0000512919	1	0,0000512919	0,25	0,6211
<b>F: Ângulo de fase</b>	0,0007959	1	0,0007959	3,81	<b>0,0533</b>
<b>RESIDUAL</b>	0,024432	117	0,000208821		
<b>TOTAL</b>	0,0258174	125			

Tabela 23 - Proporção baseada no erro quadrático médio residual.  
Fonte: Autoria própria.

A Tabela 23 MANOVA acima decompõe a variabilidade de Erro de Frequência em contribuições devidas a vários fatores. O Tipo III (padrão) que é a soma de quadrados foi o método escolhido e a contribuição de cada fator é medida tendo removido os efeitos de todos os outros fatores. Os valores P testam a significância estatística de cada um dos fatores sobre o resultado como um todo.

Uma vez que não há valores de P inferiores a 0,05, nenhum dos fatores têm um efeito estatisticamente significativo sobre Erro de Frequência no nível de confiança 95,0% para os dois níveis selecionados.

Porém, dentre esses fatores, deve-se olhar com atenção para o parâmetro Ângulo de Fase, uma vez que o mesmo apresentou valor apenas um pouco superior a 0,05. Ou seja, dentro de uma análise mais profunda, com a faixa de operação dos parâmetros analisados maior, deve-se testar principalmente uma maior gama de valores de ângulo de fase.

Pela Figura 25 é fácil observar que o intervalo de confiança para um nível do parâmetro de ângulo de fase está interseccionado no intervalo do outro nível analisado e conseqüentemente esse parâmetro não tem significância estatística suficiente sobre o resultado final. E o contrário é válido, já que da mesma forma é fácil observar que esse parâmetro está bem próximo de se tornar significativo.

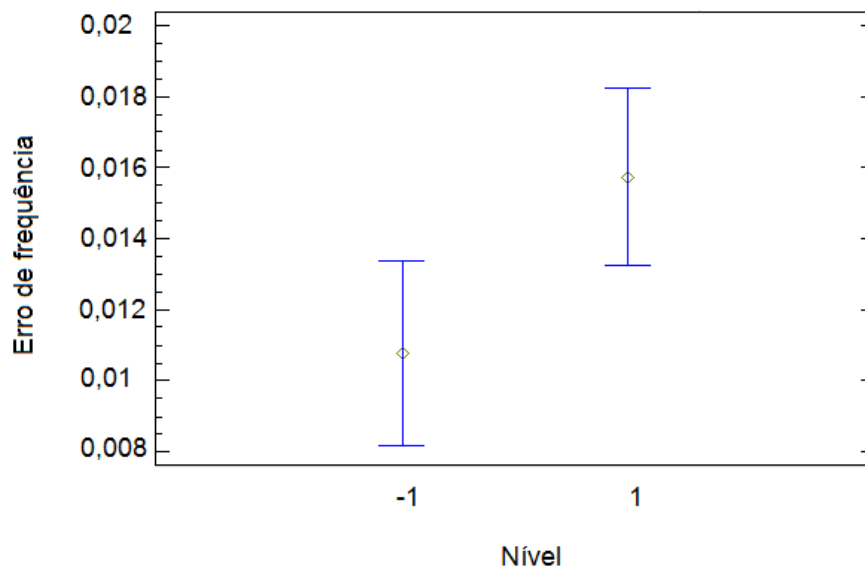


Figura 25 - Média de erros de Frequência  
Fonte: Autoria própria (Statgraphics)

### 8.3.2. Análise Estatística Sobre O Erro De Amplitude De Movimento

Utilizando o mesmo critério, para a análise estatística dos resultados, também com um nível de iterações e confiabilidade de 95%, pode-se determinar quais parâmetros influenciam de forma direta nessa matriz resposta, no caso o erro de amplitude.

#### Análise da Variância para o Erro de Amplitude de Movimento - MANOVA

<i>Origem</i>	<i>Soma dos Quadrados</i>	<i>Df</i>	<i>Média Quadrática</i>	<i>F - Pro- porção</i>	<i>P-Valor</i>
<b>PRINCIPAIS EFEITOS</b>					
<b>A: Bloco</b>	0,0541977	3	0,0180659	6,11	0,0007
<b>B: Geometria</b>	0,011383	1	0,011383	3,85	0,0522
<b>C: Tamanho</b>	0,00798229	1	0,00798229	2,70	0,1031
<b>D: Distância</b>	0,00868724	1	0,00868724	2,94	0,0892
<b>E: Ângulo</b>	0,000278373	1	0,000278373	0,09	0,7596
<b>F: Ângulo de fase</b>	0,000412714	1	0,000412714	0,14	0,7094
<b>RESIDUAL</b>	0,346103	117	0,00295814		

<b>TOTAL</b>	0,429086	125
--------------	----------	-----

Tabela 24 - Proporção baseada no erro quadrático médio residual  
 Fonte: Autoria própria

A Tabela 24 MANOVA acima decompõe a variabilidade de Erro de Amplitude de Movimento em contribuições devidas a vários fatores. O mesmo Tipo III (padrão) que é a soma de quadrados foi o método escolhido e a contribuição de cada fator é medida tendo removido os efeitos de todos os outros fatores. Os valores P testam a significância estatística de cada um dos fatores sobre o resultado como um todo. Neste caso, há valores de P inferiores a 0,05, ou seja, o parâmetro Bloco têm um efeito estatisticamente significativo sobre Erro de Amplitude de Movimento no nível de confiança 95,0% para os dois níveis selecionados.

O parâmetro bloco porém, não é um parâmetro analisado no desenvolvimento desta metodologia. Neste ponto ele entra em questão para averiguar se algum fator externo, como características climáticas ou troca de operador, influenciam na leitura e captação das imagens, pois na verdade, ele é apenas uma sequência de testes repetidos aleatoriamente em outro bloco. Isso é realizado para garantir repetibilidade experimental, como já discutido anteriormente.

Pela Figura 266 é fácil perceber que o intervalo de confiança de um dos blocos de medida está muito distante dos demais, o que sugere que este bloco, por algum motivo externo aos parâmetros testados foi influenciado significativamente.

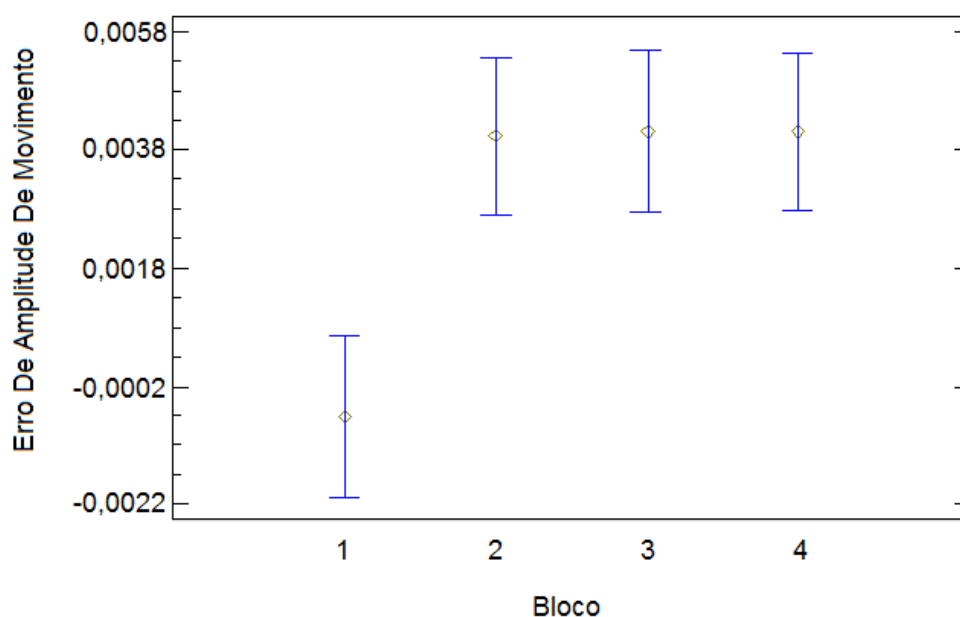


Figura 26 - Média de erros de amplitude em relação aos Blocos

Fonte: Autoria própria (Statgraphics)

Sendo assim, para a análise estatística dos Erros De Amplitude os resultados obtidos no primeiro bloco são descartados e analisado somente os demais.

Dentre esses fatores, ainda deve-se olhar com atenção para o parâmetro Distância de Filmagem e Geometria do Ponto, uma vez que esses parâmetros apresentaram valor apenas um pouco superior a 0,05. Ou seja, dentro de uma análise mais profunda, com a faixa de operação dos parâmetros analisados maior, deve-se testar principalmente uma maior gama de valores de distâncias e outros geometrias.

Com a ajuda da Figura 27 é fácil observar que o intervalo de confiança para um nível do parâmetro Distância está interseccionado no intervalo do outro nível analisado e conseqüentemente esse parâmetro não tem significância estatística suficiente sobre o resultado final. E o contrário é válido, já que da mesma forma, é fácil observar que esse parâmetro está bem próximo de se tornar significativo.

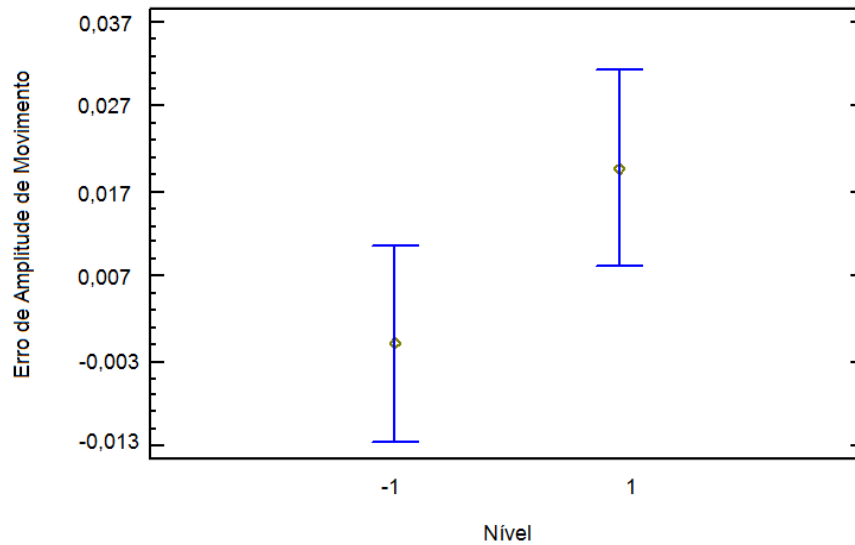


Figura 27 - Média de erros de Erro de Amplitude de Movimento  
 Fonte: Autoria própria (Statgraphics)

Com base nos resultados e nos níveis escolhidos (mínimo/máximo), do ponto de vista estatístico, esses níveis não têm influência suficiente para convergirem para o mesmo erro na determinada situação, no caso, parâmetro. Nesse sentido, nessas faixas de variação de nível, independentemente de quais parâmetro o operador selecione à medição de vibração por imagem tem um erro esperado e que depende de fatores externos, já que esses parâmetros não possuem importância estatística significativa, como as reais medidas desses parâmetros e a qualidade da imagem.

Além disso, esse resultado pode estar indicando que os valores estabelecidos para o experimento devessem abranger uma faixa um pouco maior, ou seja, que talvez exista influência desses fatores, principalmente na distância de filmagem para o erro de Amplitude de Movimento e o Ângulo de Fase para a medida do erro de Frequência.

Ou ainda, em outras palavras, para o erro em frequência o fator mais próximo de ser significativo é o ângulo de fase, o que indica que se for estabelecido um valor máximo levemente superior a 44RPM já seria suficiente para se tornar um parâmetro significativo. Para o erro em amplitude o fator mais próximo de ser significativo é a geometria, o que indica que caso este parâmetro tivesse uma gama maior de opções e que o parâmetro distância, se for estabelecido um valor máximo levemente superior a 45 cm, seriam suficientes para se tornarem significativos.

#### 8.4. ANÁLISE ESTATÍSTICA DESCRITIVA

Como os resultados não tiveram significância estatística entre os experimentos, apresenta-se uma estatística descritiva sobre os erros encontrados neste trabalho de conclusão de curso.

O procedimento de análise de múltiplas variáveis foi concebido para sintetizar várias colunas de dados quantitativos. Ele calcula várias estatísticas, incluindo correlações, covariâncias e correlações parciais. Também estão incluídos no procedimento uma série de gráficos multivariados, que dão vistas interessantes sobre o dado.

#### Dados Estatísticos Resumidos.

	<i>ERRO DE FREQUÊNCIA</i>	<i>ERRO DE AMPLITUDE</i>
<b>Contagem</b>	126	95
<b>Média</b>	0,0132993	0,0405764
<b>Desvio Padrão</b>	0,0143715	0,0418801
<b>Coefficiente De variação</b>	108,062%	103,213%
<b>Mínimo</b>	-0,05925	0,00012
<b>Máximo</b>	0,08036	0,2612
<b>Intervalo</b>	0,13961	0,26108
<b>Stnd. skewness</b>	-0,74474	8,94689
<b>Stnd. kurtosis</b>	42,7421	15,3852

Tabela 25 - Dados estatísticos resumidos.  
Fonte: Autoria própria

A Tabela 25 mostra as estatísticas resumidas para cada uma das variáveis de dados selecionados. Ela inclui medidas de tendência central, medidas de variabilidade e medidas de forma. O padrão de Kurtosis e a assimetria padrão, normalizada, pode ser utilizada para determinar se a amostra é proveniente de uma distribuição normal ou não. Valores dessas estatísticas, no caso assimetria padrão, fora do intervalo de -2 a 2 indicam desvios significativos de normalidade, o que tenderia a invalidar muitos dos procedimentos estatísticos normalmente aplicados a esses dados. Neste caso, a variável erro de amplitude de movimento apresenta valores padronizados de assimetria fora da faixa esperada.



Já valores do padrão de Kurtosis fora do intervalo, indicam desvios significativos de normalidade, ou seja, ambos os erros apresentam valores padronizados Kurtosis fora da faixa esperada.

A Tabela 26 mostra os intervalos de confiança de 95,0% para as médias e desvios padrões de cada uma das variáveis analisadas, no caso erro relativo de frequência e erro relativo de amplitude. Estes intervalos estão vinculados com o erro de amostragem e podem ser usados para ajudar a julgar o quão precisamente as populações médias e desvios padrões foram estimados. Os intervalos supõem que as populações de que as amostras vêm podem ser representadas por distribuições normais. Enquanto os intervalos de confiança para os meios são bastante robustos e não muito sensíveis a violações deste pressuposto, os intervalos de confiança para os desvios padrões são bastante sensíveis.

#### Intervalo De Confiança De 95,0%

	MÉDIA	ERRO PADRÃO	LIMITE INFERIOR	LIMITE SUPERIOR
<b>Erro de frequência</b>	0,0132993	0,00128031	0,0107654	0,0158332
<b>Erro de Amplitude</b>	0,0405764	0,00429681	0,032045	0,0491078

	SIGMA	LIMITE INFERIOR	LIMITE SUPERIOR
<b>Erro de frequência</b>	0,0143715	0,0127893	0,0164042
<b>Erro de Amplitude</b>	0,0418801	0,0366541	0,0488578

Tabela 26 - Intervalo de confiança de 95,0%  
Fonte: Autoria própria

Esta tabela mostra as correlações de Pearson, momento do produto entre cada par de variáveis. Estes coeficientes de correlação variam entre -1 e +1 e medem a força da relação linear entre as variáveis. O terceiro número em cada posição da tabela é um valor -P que testa a significância estatística das correlações estimadas. Os valores P abaixo de 0,05 indicam correlações não nulas e estatisticamente significativas ao nível de confiança de 95,0%. Também é mostrado entre parênteses o número de pares de valores de dados utilizados para calcular cada coeficiente.

#### Correlações

	ERRO (FREQUÊNCIA)	ERRO (AMPLITUDE)_2
<b>Erro de frequência</b>		-0,0560 (95)
<b>p-Valor</b>		0,5901

<b>Erro de amplitude</b>	-0,0560
	(95)
<b>p-Valor</b>	0,5901

Tabela 27 – Correlações  
 Fonte: Autoria própria

Pela Figura 28, fica claro que o erro em frequência está bastante concentrado, não caracterizando uma distribuição normal.

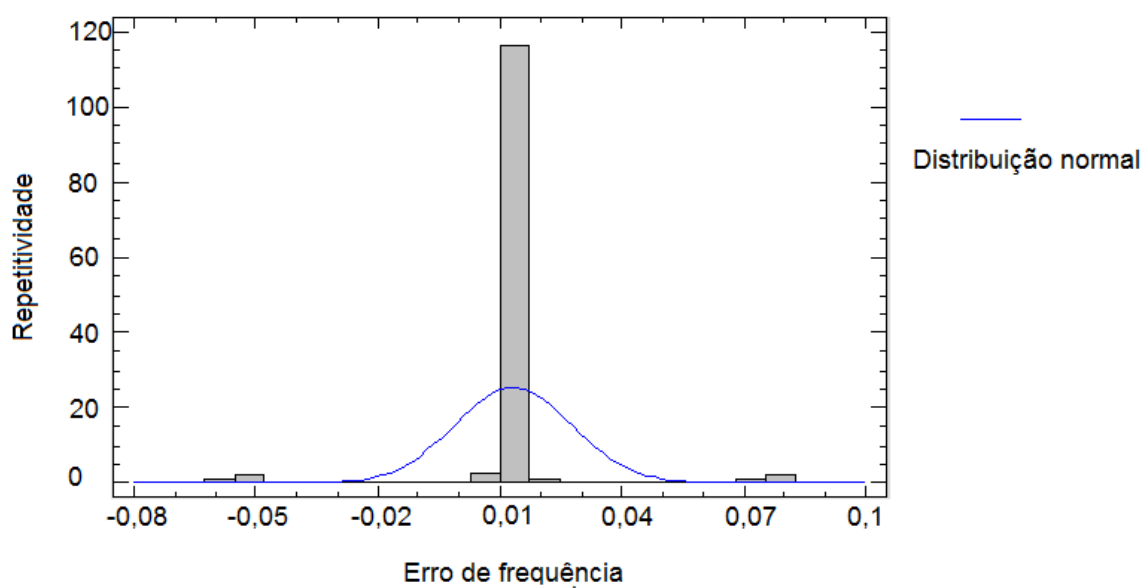


Figura 28 - Distribuição dos erros de frequência  
 Fonte: Autoria própria (Statgraphics)

E o mesmo se aplica para a distribuição dos Erros de Amplitude, conforme Figura 29.

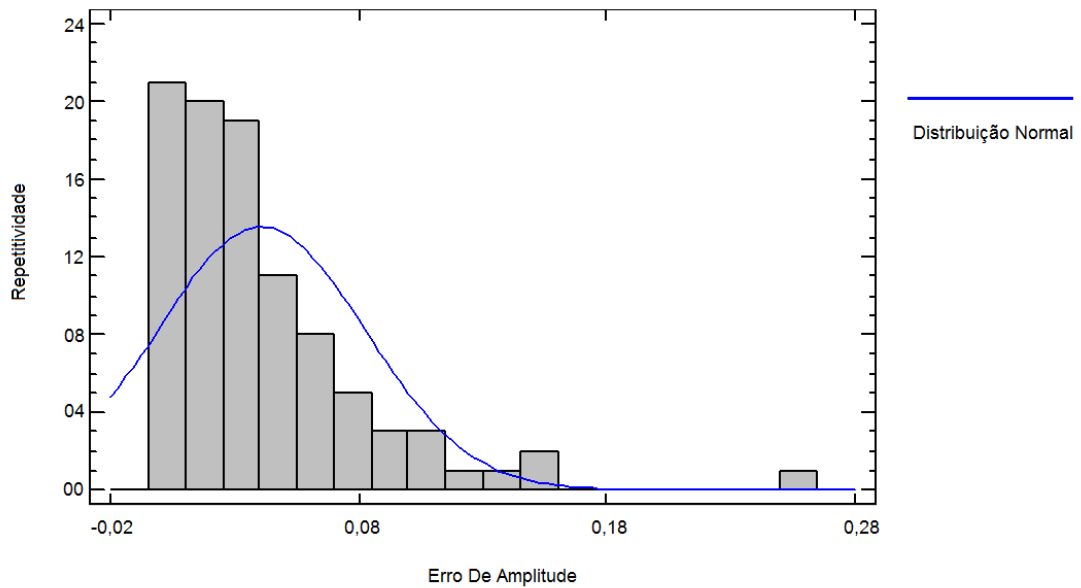


Figura 29 - Distribuição dos erros de amplitude  
 Fonte: Autoria própria (Statgraphics)

Os resultados de testes executados para determinar se o erro de amplitude pode ser adequadamente modelado por uma distribuição normal. Uma vez que o valor P menor entre os testes realizados é maior ou igual do que a 0,05, que não pode rejeitar a ideia de que erro de amplitude se trata de uma distribuição normal com 95% de confiança. O teste Kolmogorov-Smirnov indica um p-valor como sendo 0,0009981, mais uma vez acima do indicado.

## 9. CONCLUSÃO

O presente trabalho teve como principal objetivo o de desenvolver uma metodologia de análise de sistemas em vibração, buscando criar uma alternativa para a metodologia desenvolvida que utiliza sensores de contato em estruturas para obter respostas de frequência e amplitude, tendo como sensor de contato mais utilizado para obter tais sinais os acelerômetros, que já foram citados anteriormente neste trabalho.

A metodologia utilizada neste trabalho, além de atuar como concorrente direta da metodologia de contato, é capaz de ir além, atuando em situações as quais utilizar sensores de contato em estruturas e equipamento não pode ser utilizado, tanto por limites de operação dos equipamentos como também por limites físicos e de acesso ao local de estudo.

Para a validação da metodologia utilizada e proposta, se fez necessário o desenvolvimento de um comparativo entre dados coletados utilizando a análise de vibrações por processamento de imagem e dados coletados utilizando-se de um sensor de contato, esta sendo um acelerômetro juntamente com seu respectivo sistema de análise de vibração em conjunto com o software de comando dos mesmos.

Para as aplicações citadas, foram determinados parâmetros básicos que influenciam a análise de vibrações por processamento de imagem, parâmetros estes que são somente o início de uma pesquisa na área, visto que as pesquisas no desenvolvimento de metodologias semelhantes e de processos de aquisição de dados com este foco são recentes e pouco difundidas dentre as universidades e centros de pesquisas tecnológicas.

Foram determinados cinco parâmetros, sendo eles a geometria do ponto, o tamanho dessa geometria, a distância entre ponto de leitura e a lente da câmera, frequência da lâmpada estroboscópica e angulação, todos estes foram analisados com a determinação de dois níveis em cada um, seguindo o planejamento fatorial de experimento, sendo um nível de máximo e outro de mínimo de cada parâmetro e considerando a variação entre eles como linear.

Como todos os parâmetros influenciam sobre o resultado de forma indireta, o planejamento fatorial se fez necessário, pois o mesmo permite avaliar a influência de cada parâmetro realizando uma série completa de testes com combinações aleatórias dos mesmos, com repetições para validação do experimento.

Foram realizados 32 testes padrões, e mais 3 repetições, concluindo com 128 testes realizados, porém somente considerados para o processamento de imagem 126 testes, os dois desconsiderados se deve ao fato dos mesmos apresentarem erro nos arquivos o que impossibilitou o processamento de dados. Como resultados foram obtidos sinais e valores de frequência e amplitude, sendo apresentados os erros em relação a análise realizado com o acelerômetro.

Para a análise de frequência, 95,2% dos testes realizados apresentaram erro inferior a 2%, caracterizando esta metodologia como confiável para a mensuração de frequência de equipamentos em vibração, de acordo com os limites aceitáveis de sensibilidade para o sensor de contato utilizado, que é de 5%, provando a viabilidade de desenvolvimento e estudo na área.

Os resultados da análise estatística focando nos parâmetros e resultados de frequência apresentam que o parâmetro que possui maior influencia dentre os abordados por este trabalho é em relação à frequência da lâmpada estroboscópica, porém, o mesmo trás como resultados a necessidade de um estudo de maior porte, considerando elevar os níveis dos parâmetros abordados para possibilitar melhores resultados da influencia dos mesmos.

Os resultados da análise focando no sinal de amplitude apresentaram maior variabilidade e maior complexidade, resultando em apenas 68,3% dos resultados de erro obtidos são inferiores ao limite de sensibilidade de 5%, e são aceitáveis para medições e aplicações práticas, sendo que como resultado da análise estatística com foco em amplitude, o parâmetro que apresentou maior influencia sobre os resultados obtidos foi a distancia entre o ponto e a câmera, porém com a mesma observação citada anteriormente de que se faz necessário um estudo de maior porte para ser possível a obtenção de resultados mais significativos sobre a influência dos parâmetros no erro resultante.

Como conclusão principal deste trabalho foi possível encontrar resultados significativos da utilização da metodologia proposta, trazendo uma confiabilidade e precisão nos resultados apresentados que conferem a análise de vibrações por processamento de imagem uma metodologia com capacidade grande capacidade de desenvolvimento e estudos futuros.

Para o custo operacional necessário para a realização dos testes e dos resultados obtidos, apresentando resultados com 0,12% para erro em amplitude e com 0,93% de erro em frequência, demonstrando que essa metodologia vem como principal inovação tecnológica tanto no ramo de vibrações mecânicas, como nos de manutenção industrial e metrologia, gerando resultados excelentes com baixo custo de implementação.

## 10. REFERÊNCIAS

- ACOUSTIC1. ***Db4 Recorder 4-Channel Analyzer***. Disponível em:  
<[Http://Www.Acoustic1.Co.Uk/?P=Nvh&C=10](http://www.acoustic1.co.uk/?P=Nvh&C=10)>. Acesso em: 27 mai. 2015.
- CANON. ***Poweshot A480***. Disponível em:  
<[Http://Www.Usa.Canon.Com/Cusa/Support/Consumer/Digital\\_Camera/Poweshot\\_A\\_Series/Poweshot\\_A480?Selectedname=Specifications](http://www.usa.canon.com/cusa/support/consumer/digital_cameras/poweshot/_A_Series/Poweshot_A480?Selectedname=Specifications)>. Acesso em: 13 mai. 2015.
- ENDEVCO. ***Isotron Accelerometer. Model 256-10-100***. Endevco Corporation, (N.D).
- FAIRBAIRN, E., ROITMAN, N., & MOREIRA, A.. ***Análise Dinâmica De Estruturas Através De Processamento De Imagens***. Rio De Janeiro - Rj: Coppe/Ufrj - Programa De Engenharia Civil, (N.D).
- HALLIDAY, D. ***Fundamentos De Física, Volume 4***. Rio De Janeiro: LTC, (2009).
- LOBÃO, F. ***Calibração Com Mapeamento Das Distorções Geométricas Aplicada A Um Sistema De Visão Estéreo***. Distrito Federal: Universidade De Brasília. Faculdade De Tecnologia, (2004).
- MATHWORKS. ***Image Processing Toolbox***. Disponível em:  
<[Http://Www.Mathworks.Com/Help/Images/Functionlist.Html](http://www.mathworks.com/help/images/functionlist.html)>. Acesso em: 15 mai. 2015.
- MENEZES JUNIOR, L. ***Processamento De Imagens Na Análise Dinâmica De Risers De Produção De Petróleo Com Modelo De Escala Reduzida Em Ambiente De Laboratório***. Campinas, Sp, Brasil: Universidade Estadual De Campinas, (2008).
- MISUTA, M. ***Rastreamento Automático De Trajetórias De Jogadores De Futebol Por Videogrametria: Validação Do Método E Análise Dos Resultados***. Campinas: Universidade Estadual De Campinas. Faculdade De Educação Física, (2004).
- MONTGOMERY, D., & RUNGER, G. ***Estatística Aplicada E Probabilidade Para Engenheiros***. LTC, (2012).
- NOGUEIRA, F. D., BARBOSA, F. D., & BARRA, L. D. ***Determinação De Frequências Naturais De Estruturas Sob Vibrações Tridimensionais A Partir De Imagens***

**Oriundas De Uma Câmera.** Juiz De Fora: Universidade Federal De Juiz De Fora, (2006).

NOGUEIRA, F., BARBOSA, F., & BARRA, L. **Identificação Das Características Modais De Estruturas Via Processamento De Imagens.** Guarapari - Espírito Santo - Brasil (2005).

QUALITAS. **Ficha Técnica Q80a3 (6p). Microventilador Q80a3 (6p).** São Paulo: Qualitas Industria Eletromecânica Ltda, (N.D.).

RANDERMANN, J., & KÄMPER, M. (2005, 05 07). **Guia Para Consulta Rápida 7/05 Awb8230-1579gb.** Moeller Gmbh.

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

SABINO, D. **Medidas De Deslocamento E Vibrações Através De Imagens De Câmeras Digitais.** Ilha Solteira: Universidade Estadual Paulista. Faculdade De Engenharia De Ilha Solteira (2013).

SCURI, A. **Fundamentos Da Imagem Digital.** Tecgraf/Puc-Rio, (2002).

TEKNIKAO. **Análisor De Vibrações Nk 100. Manual De Operação.** Brasil: TEKNIKAO, (N.D.).