

**CENTRO UNIVERSITÁRIO DO SUL DE MINAS – UNIS**  
**ENGENHARIA MECÂNICA**  
**JEAN PAULO DE OLIVEIRA**

**ESTUDO DE VIBRAÇÕES EM MOTORES ELÉTRICOS**

**Varginha**  
**2018**

**JEAN PAULO DE OLIVEIRA**

**ESTUDO DE VIBRAÇÕES EM MOTORES ELÉTRICOS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao curso de Engenharia Mecânica do Centro Universitário do Sul de Minas - UNIS, como pré-requisito para a obtenção do grau bacharel em Engenharia Mecânica sob orientação do Prof. Esp. Jonathan de Oliveira Nery.

**Varginha  
2018**

**JEAN PAULO DE OLIVEIRA**

**ESTUDO DE VIBRAÇÕES EM MOTORES ELÉTRICOS**

Trabalho de conclusão de curso apresentada ao curso de engenharia mecânica do Centro Universitário do Sul de Minas, como pré-requisito para obtenção do grau de bacharel pela banca examinadora composta pelos membros:

Aprovado em    /    /

---

Professor(a)

---

Professor(a)

---

Professor(a)

**OBS.:**

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço primeiramente a Deus, por ter me dado discernimento, a minha família por ter me acompanhado nesta caminhada, a minha noiva por estar sempre presente e me auxiliando, a todos os colegas de classe e professores, por fazer parte desta conquista.

Há três caminhos para o fracasso: não ensinar o que se sabe, não praticar o que se ensina, e não perguntar o que se ignora.

São Beda.

## RESUMO

O estudo sobre métodos de manutenção preditiva se faz cada dia mais presente, a fim de evitar falhas inesperadas, aumentar confiabilidade nos equipamentos, diminuir gastos desnecessários e aumentar a vida útil de máquinas. O trabalho em questão foi desenvolvido utilizando a análise de vibração como modelo de manutenção preditiva em motores elétricos. A utilização de um analisador Vibxpert II, da PRÜFTECHNIK para coleta de dados, foi a metodologia adotada. A análise foi feita mediante a um motor com dois discos, sendo que foram coletados dados do motor balanceado e posteriormente do motor com uma massa adicional desbalanceada. Os efeitos de ressonância e transmissibilidade, juntamente com a força centrípeta gerada pelo desbalanceamento foram assuntos abordados. Sendo assim é de grande importância se evitar a frequência em que acontece a ressonância para diminuir efeitos de desgastes prematuros de peças do motor, e é essencial manter os equipamentos balanceados para diminuir as vibrações do motor e de todo conjunto de fixação.

**Palavras-chave:** Análise vibracional. Ressonância. Força centrípeta. Desbalanceamento.

## **ABSTRAT**

*The procedure on predictive maintenance methods is increasingly present, in order to avoid unexpected ones, increase equipment efficiency, reduce unnecessary expenses and increase machine life. The work in question was developed using vibration analysis as a model of predictive maintenance in electric motors. The use of a Vibxpert II analyzer from PRÜFTECHNIK for data collection was the methodology adopted. The analysis was done by means of a motor with two disks, and data from the balanced motor and later from the motor were collected with an additional unbalanced mass. The effects of resonance and transmissibility along with the centripetal force generated by the imbalance were discussed. Therefore, it is of great importance to avoid the frequency at which the resonance occurs to reduce the effects of premature wear of engine parts, and it is essential to keep the equipment balanced to reduce the vibrations of the engine and of any attachment assembly.*

**Keywords:** *Vibrational analysis. Resonance. Centripetal force. Unbalance.*

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1: Representação do nível de vibração.....	19
Figura 2: Análise de espectro de vibração em motores elétricos .....	21
Figura 3: Representação de massa desbalanceada.....	22
Figura 4: Força harmônica em fase com a força de excitação .....	25
Figura 5: Força harmônica em fase contrária a força de excitação .....	26
Figura 6: Força harmônica em ressonância .....	26
Figura 7: Transmissibilidade .....	27
Figura 8: Etapas dos procedimentos realizados.....	29
Figura 9: Discos do motor trifásico .....	30
Figura 10: PRÜFTECHNIK - VIBXPERT II.....	30
Figura 11: Motor desbalanceado .....	31
Figura 12: Testes com frequências específicas em motor trifásico balanceado .....	33
Figura 13: Testes com frequências específicas em motor trifásico desbalanceado.....	35
Figura 14: Análise da amplitude de velocidade do motor trifásico.....	37
Figura 15: Análise amplitude de velocidade do motor trifásico em sua rotação máxima 1800 rpm.....	38
Figura 16: Espectro de velocidade do motor trifásico balanceado em 30 Hz .....	39
Figura 17: Espectro de velocidade do motor trifásico desbalanceado em 30 Hz.....	40
Figura 18: Espectro de velocidade em um motor trifásico balanceado em 5 Hz .....	40
Figura 19: Espectro de velocidade em um motor trifásico desbalanceado em 5 Hz.....	41



## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

DFT – *Discrete Fourier Transform*

g – aceleração da gravidade

Hz – Hertz

Kg – kilograma

Kw – Kilowatt

m – metro

mm/s – milímetros por segundo

ms – milissegundo

N – Newton

N/m – Newton por metro

rad/s – radiando por segundo

RMS – *Root Mean Square*

RPM – Rotação por minuto

e – raio da massa desbalanceada

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>13</b>
<b>2 REFERENCIAL TEÓRICO .....</b>	<b>15</b>
<b>2.1 Motores elétricos de indução trifásica .....</b>	<b>15</b>
<b>2.2 Manutenção .....</b>	<b>16</b>
2.2.1 Importância da manutenção preditiva.....	17
<b>2.3 Vibrações mecânicas .....</b>	<b>17</b>
2.3.1 Importância do estudo de vibração .....	18
<b>2.4 Análise de vibração.....</b>	<b>18</b>
<b>2.5 Análise espectral e os seus princípios.....</b>	<b>20</b>
<b>2.6 Vibrações de origem mecânica .....</b>	<b>21</b>
<b>2.7 Frequência natural, ressonância e transmissibilidade .....</b>	<b>23</b>
<b>3 MATERIAL E MÉTODOS .....</b>	<b>29</b>
<b>3.1 Delineamento experimental .....</b>	<b>29</b>
<b>3.2 Análise de vibração por variação de frequência em motor trifásico balanceado .....</b>	<b>29</b>
<b>3.3 Procedimento de desbalanceamento .....</b>	<b>31</b>
<b>3.4 Análise de vibração por variação de frequência em motor trifásico desbalanceado .....</b>	<b>31</b>
<b>3.5 Interpretação da análise de vibração em motor trifásico balanceado e desbalanceado .....</b>	<b>32</b>
<b>4 RESULTADOS .....</b>	<b>33</b>
<b>5 DISCUSSÃO .....</b>	<b>41</b>
<b>6 CONCLUSÃO.....</b>	<b>43</b>
<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>46</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Na indústria é possível perceber que a tecnologia avançada vem causando impactos. Desta forma, tem gerado processos significativos na manufatura e informatização das máquinas. Tal informatização possibilitou o desenvolvimento de painéis que funcionam como computadores e o setor de manutenção teve que se adequar a estas inovações. A manutenção preditiva faz parte destas adequações e tem se tornado importante na indústria em decorrência destas inovações. A análise de manutenção preditiva visa especificar as condições reais dos equipamentos de máquinas, coletando dados que indicam a vida útil dos componentes. O intuito desta aplicação é que todos os equipamentos de motores elétricos sejam bem aproveitados e um melhor controle de intervenções em máquinas. Este modelo de manutenção preditiva visa diminuir gastos para uma empresa evitando manutenção corretiva e aumentando controle de qualidade e produtividade. Uma vez que, os motores elétricos é uma parte fundamental de uma máquina e deve-se ter um controle assíduo de seu funcionamento para garantir a confiabilidade. Além de que, há poucos estudos relacionados às análises de condições reais de motores elétricos demonstrando a importância para as condições financeiras de uma empresa.

Uma pergunta se faz necessário para a condução deste estudo. Como aumentar a vida útil de motores elétricos e a confiabilidade de funcionamento de máquinas? Com a implantação de uma análise sistemática da manutenção preditiva se detecta a vida útil de um equipamento gerando menos gastos e aumentando o controle de qualidade e confiabilidade evitando possíveis danos à máquina.

Desta forma, objetivo geral do trabalho é apresentar um estudo de vibrações em motores elétricos. Os objetivos específicos são; verificar qual é a frequência natural do motor em estudo, através do teste de *run up*, alterando a frequência de operação de forma progressiva até que ela incida com a frequência natural gerando a ressonância. Apresentar simulações com o motor balanceado e desbalanceado com o propósito de analisar o efeito da amplificação dinâmica na ressonância. Para isto o trabalho foi realizado a partir de simulações em um motor elétrico trifásico analisando o efeito de vibrações estando balanceado e desbalanceado. Ao final do estudo propor propostas para evitar eliminar desmontagens desnecessárias dos motores elétricos e podendo determinar a utilização de maior vida útil total dos componentes de motores elétricos.

A necessidade de máquinas confiáveis e com alto rendimento, vem a cada dia aumentando, e com este foco a manutenção preditiva é a que mais oferece benefícios as indústrias neste sentido. Ela tem uma alta confiabilidade e uma economia considerável em relação à manutenção corretiva, onde se tem paradas de produção e possíveis danos mais graves pela falta de reconhecimento das peças de desgaste das máquinas, gerando prejuízos consideráveis, e também em relação à manutenção preventiva onde muitas das vezes efetuam trocas de peças de desgaste sem a devida necessidade.

O motor elétrico é um dos principais componentes da maioria das máquinas industriais, sendo assim a implantação da manutenção preditiva, é de alta viabilidade e importância, para uma produtividade sem imprevistos indesejados. A manutenção preditiva irá utilizar de equipamentos tecnológicos para a análise das peças de desgaste do motor, assegurando que seu tempo de funcionamento seja estendido, e também se detecta qualquer avaria no início, garantindo que não haverá danos maiores ao equipamento. Uma destas técnicas de análise das peças é análise vibracional, na qual é possível verificar a vibração mecânica do motor e determinar a frequência natural do mesmo. Um dos grandes problemas é quando o motor trabalha com altos níveis de vibração e entra em processo de ressonância, neste caso pode ocorrer que os danos nos componentes do mesmo ocorram com mais rapidez.

Para compreender os efeitos da vibração e a possível ressonância nos motores elétricos trifásicos o estudo foi realizado simulando condições específicas para os testes como, por exemplo, o desbalanceamento. A partir desta simulação utilizando um equipamento portátil de análise de vibração foi possível identificar em qual frequência o motor entrava em processo de ressonância.

O processo de ressonância pode ocorrer quando uma frequência de excitação, que pode ser a frequência de rotação do equipamento coincide com a frequência natural no motor. Quando isto ocorre não é bem-vindo, visto que pode diminuir a vida útil dos componentes de um motor. Desta forma é de extrema importância compreender os efeitos das vibrações em motores trifásicos e quais são os efeitos ocasionados pela ressonância nestes.

## **2 REFERENCIAL TEÓRICO**

A seguir será apresentada uma revisão sobre o estudo da manutenção e análise vibracional, pois se faz muito importante, e é de interesse das indústrias ter conhecimento de novas formas de obter resultados satisfatórios com os avanços tecnológicos a partir da manutenção preditiva.

### **2.1 Motores elétricos de indução trifásica**

Na indústria a tecnologia avançada vem causando impactos e gerando processos significativos na manufatura e informatização das máquinas, que por sua vez acabaram ganhando painéis que funcionam como computadores. A manutenção teve que se adaptar e se atualizar ao novo modo de funcionamento dos equipamentos de modo geral (GONÇALVES, 1994).

O motor elétrico de indução é o centro de muitos processos industriais por ser versátil e de fácil utilização, combinando robustez, eficiência, confiabilidade e baixo custo (IMMOVILLI et al, 2010). Segundo estudos há em torno de 16,1 bilhões de motores elétricos no mundo operando e apresentando uma taxa de crescimento de 50% nos últimos cinco anos. As falhas observadas nestes podem ser ocasionadas por diversos fatores entre eles, ambientais, elétricos, térmicos ou mecânicos. Portanto, para a manutenção o motor elétrico quando não operando de forma correta é o componente, que em longo prazo é o responsável por um dos maiores gastos com energia elétrica, sendo responsáveis por aproximadamente por 70% (Eletrobrás/PROCEL, 2015). O motor elétrico tem como sua principal função transformar energia elétrica em mecânica (GONGORA et al, 2016). Ainda segundo Gongora et al (2016), para que o motor elétrico mantenha um funcionamento ideal, é necessária uma manutenção eficiente, pois todos os processos produtivos estão de alguma forma ligado a utilização do motor e falhas impactam diretamente no custo do produto final.

As falhas que podem ocorrer em motores elétricos podem ser divididas respectivamente no percentual de 69% e são decorrentes em falhas e desgaste de rolamentos, 21% no enrolamento do estator e apenas 7% no rotor (BELLINE et al, 2008). Sendo possível verificar que o motor elétrico pode apresentar uma grande variedade de falhas e sendo assim necessário técnicas para detecção destas falhas para que tenha uma maior vida útil de seus componentes, melhor produtividade e controle de qualidade dos produtos.

## 2.2 Manutenção

A manutenção possui como característica a combinação de ações sendo; técnicas e administrativas, incluindo as de supervisão, destinadas a manter ou recolocar um item em um estado no qual possa desempenhar uma função requerida (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1994). As intervenções realizadas pela manutenção podem ser classificadas nos seguintes tipos:

**Preventiva:** Realizada através de intervenção que são programadas e baseadas em resultados estatísticos ou em informações que são dadas pelo fabricante. Desse modo, o objetivo principal é redução de falhas em um equipamento com o intuito de evitar a parada do mesmo por quebra (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1994).

**Corretiva:** Consiste em intervenções que ocorrem após a avaria do equipamento e permite que os mesmos voltem ao funcionamento.

**Preditiva:** Tem a finalidade garantir um controle da qualidade do serviço, com base na aplicação sistemática de técnicas de análise, utiliza supervisões centralizadas ou de amostragem com o intuito de reduzir o mínimo a manutenção preventiva e diminuir a corretiva (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS 5462, 1994).

A manutenção preditiva possui como principais técnicas: análise de vibração, termográfica, de lubrificantes, ultrassom e líquido penetrante; A análise de vibração é o método usado para monitorar a condição de máquinas e equipamentos utilizando parâmetros relacionados a possíveis falhas. Este consiste em fixar sensores em pontos específicos dos equipamentos medindo a vibração mecânica sendo este posteriormente analisado (GONGORA et al, 2016).

Já a termográfica tem por finalidade permitir o acompanhamento de temperatura e formação de imagens térmicas, que tem a função de diagnosticar precocemente falhas e outros problemas em componentes elétricos, mecânicos e em processos produtivos. No entanto, a análise de lubrificantes visa examinar itens como viscosidade, acidez, teor de água e outras fontes de contaminação podendo estes comprometer a operação do equipamento. O ultrassom possui a finalidade de detectar descontinuidades internas pelo modo de propagação das ondas sonoras por meio da peça. A aplicação pode ser feita em containers, tubulações, trocadores de calor e outros. Na técnica de líquido penetrante tem a função de detectar descontinuidades essencialmente superficiais e que sejam abertas na superfície como trincas, poros e dobras (HOLANDA, 2016).

Outra técnica bem difundida é a análise de corrente, que consiste em monitorar sinais elétricos em um equipamento e, por meio deles, monitorar a condição de funcionamento, cujas variações, nos sinais de tensão e corrente, são analisadas e correlacionadas com uma falha potencial (GONGORA et al, 2016).

### 2.2.1 Importância da manutenção preditiva

A manutenção industrial assumiu um papel importante no ciclo produtivo e passou por evolução pelo fato de ter uma nova realidade de mercado. Esta evolução pode ser compreendida em três fases, na primeira não era priorizada a manutenção em virtude da produção não ser o foco e aplicava somente a manutenção corretiva. Após segunda guerra mundial, cresceu esta necessidade de produtividade e as máquinas também modernizaram e somente a aplicação da manutenção corretiva não era efetiva, com este novo modelo, sendo necessária maior confiabilidade e produtividade das máquinas nascendo desta maneira, a manutenção preventiva. Já na terceira fase o setor industrial despertou para um novo método de manutenção, já que a parada de máquinas para revisões afetava na questão produtiva e surgindo a manutenção preditiva, sendo esta menos onerosa se comparada com as demais (ANDRADE et al, 2015).

A manutenção preditiva consiste em atividades que possuem o objetivo de prever falhas através de monitoramento de máquinas (GONÇALVES NETO et al, 2013). De acordo com Willians et al (2012) a manutenção preditiva pode ser adaptada sendo como um modelo não invasivo com coleta de dados elétricos e eletromecânicos, predizendo a condição real da máquina.

## 2.3 Vibrações mecânicas

A definição de vibrações consiste em fenômenos que ocorrem o tempo todo no universo. Elas podem ocorrer desde grandes fenômenos naturais, como exemplo: tremores de terra, utilização de aparelhos domésticos, uso de transportes que ao percorrer vias irregulares possam induzir sensações desagradáveis aos usuários, máquinas industriais podendo induzir vibrações nos operadores ou até mesmo em outras máquinas vizinhas (HOLANDA, 2016). De acordo com Rao (2008), as atividades humanas executadas em sua maioria envolve o fenômeno de vibração de uma forma ou de outra.

Portanto, verifica-se que o fenômeno de vibração aparece em alguns momentos desagradáveis pelo desconforto que é gerado como no caso quando sentimos nosso tímpano vibrar ao ouvir um som alto. No entanto, este fenômeno é essencial para o mundo físico e a vida, pois os batimentos cardíacos também são movimentos vibratórios do coração (RAO, 2008).

### 2.3.1 Importância do estudo de vibração

O estudo de vibrações na engenharia é extremamente importante, pois os efeitos deste fenômeno pode em alguns casos ser catastróficos quando considera desgaste prematuro de peças que podem resultar em falhas por fadiga do material, rupturas ocasionadas por cargas dinâmicas, que por vez podem ser cargas moderadas, mas que submetidas a movimentos cíclicos e ininterruptos. No entanto, se não for possível reduzir a intensidade de vibração nestes casos, deve-se ao menos tentar manter sob controle. Isto pode ser possível por meio de programação da manutenção ou antecipar a substituição de alguns componentes mecânicos (HOLANDA, 2016).

O controle da vibração deve ser levado em consideração desde o início da etapa do projeto na concepção de uma máquina, pois se devem levar em conta quais elementos podem ser afetados quando isto não é possível (FRANÇA & SORTELO, 2013). São muitos os recursos dedicados no aprimoramento de máquinas de vários níveis de complexidade, assim como instrumentos que possam auxiliar no monitoramento, controle e identificação das fontes de vibração. Portanto, é importante o estudo e compreensão dos conceitos e os fundamentos da teoria da vibração mecânica e associada à manutenção preditiva, com o intuito de melhorar a operação das máquinas que são submetidas a vibrações e ruídos.

## 2.4 Análise de vibração

Segundo Rao (2008), um movimento qualquer que se repita após, um intervalo de tempo pode ser considerado como vibração. Uma massa suspensa e acoplada a uma mola presa a um referencial, que se desloca da sua posição inicial até um limite superior e inferior, logo após retornando a sua posição inicial é um sistema vibratório simplificado.

A análise vibracional é o método utilizado, para monitorar as condições de máquinas e equipamentos, em que se faz uso de parâmetros que são relacionados com possíveis defeitos ou falhas; seus princípios estão inseridos dentro do contexto da manutenção preditiva. O



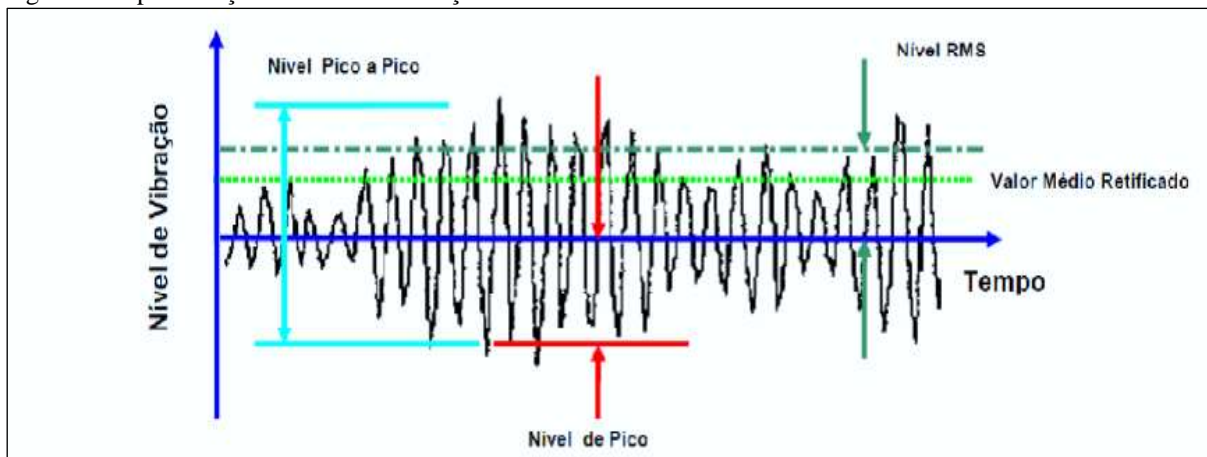
procedimento consiste em fixar ou posicionar sensores, em pontos específicos do equipamento, visto que estes sensores medem a sua vibração mecânica que, posteriormente, os resultados serão analisados (GONGORA et al, 2016).

Segundo Kardec e Nascif (2009, p. 244), Os termos de deslocamento, velocidade e aceleração representam “o quanto o equipamento está vibrando”. Os parâmetros de medidas da vibração são quase universalmente medidos em unidades métricas de acordo com recomendações de normas como a ISO10816.

A origem das vibrações pode ser após o desgaste de componentes e este acarreta uma alteração da distribuição de energia de vibração podendo levar à parada da máquina. O excesso de vibração pode ocorrer em razão da coincidência das frequências de excitação com a frequência natural das máquinas ou peças. Desta forma, através da análise de frequência pode-se descobrir a causa das vibrações indesejadas (CAVALCANTE E JESUS, 2011).

Segundo Cavalcante e Jesus (2011), é possível quantificar vibrações, no entanto deve ser levado em consideração amplitude das oscilações com o valor de pico, pico a pico e RMS (*Root Mean Square*) como representado na figura 1.

Figura 1: Representação do nível de vibração



Fonte: (CAVALCANTE E JESUS, 2011)

O valor encontrado no nível de Pico é utilizado para identificação de choques de curta duração, porém, indica somente a ocorrência do pico, e não considera o histórico no tempo da onda (HOLANDA, 2016).

O valor Pico a Pico indica as amplitudes máximas de ondas, sendo assim o maior ciclo, este valor é utilizado na identificação de falhas nos estágios prematuros e avançados, esta análise não leva em consideração o histórico no tempo da onda (HOLANDA, 2016).

O “*Root Mean Square*” (RMS) é definido como valor médio quadrático. O valor de RMS é o parâmetro utilizado para mensurar o nível mais relevante, por levar em consideração o histórico da onda no tempo, no qual evidencia a severidade da energia contida no sinal, ou seja, a capacidade destrutiva dos efeitos desta vibração (HOLANDA, 2016).

O sensor utilizado para medição é o sensor de vibração. Sendo este um dispositivo que transforma o movimento associado ao processo vibratório em sinal de vibração. A partir daí permite a medição, monitoração e análise. Há dois tipos de sensores sendo eles: absoluto e elétrico representativo (GONÇALVES NETO et al, 2013). Tais sensores são utilizados para a coleta de dados de vibrações mecânicas e sendo conhecidos como transdutores por serem capazes de transformar um sinal mecânico de vibração em sinal elétrico (SEQUEIRA, 2013).

Os instrumentos utilizados para o processo de monitoração de vibração são: Medidor de vibração de nível global e Analisadores de frequência por Transformada de Fourier.

Os medidores de vibração de nível global; são instrumentos capazes de medir o valor global de vibração em uma extensa faixa de frequência. O valor global está relacionado com a vibração total resultante da ação de todas as frequências presentes no sinal de vibração. O analisador de frequência por transformada de Fourier coleta vibrações de vários pontos do equipamento, gerando vários níveis de vibrações, que por sua vez produzem formas de ondas complicadas. Para que estas ondas possam ser analisadas em determinados níveis separadamente é utilizada a operação matemática DFT - Discrete Fourier Transform (Transformada Discreta de Fourier). Esta operação proporciona a conversão dos dados no domínio do tempo em dados da frequência (HOLANDA, 2016).

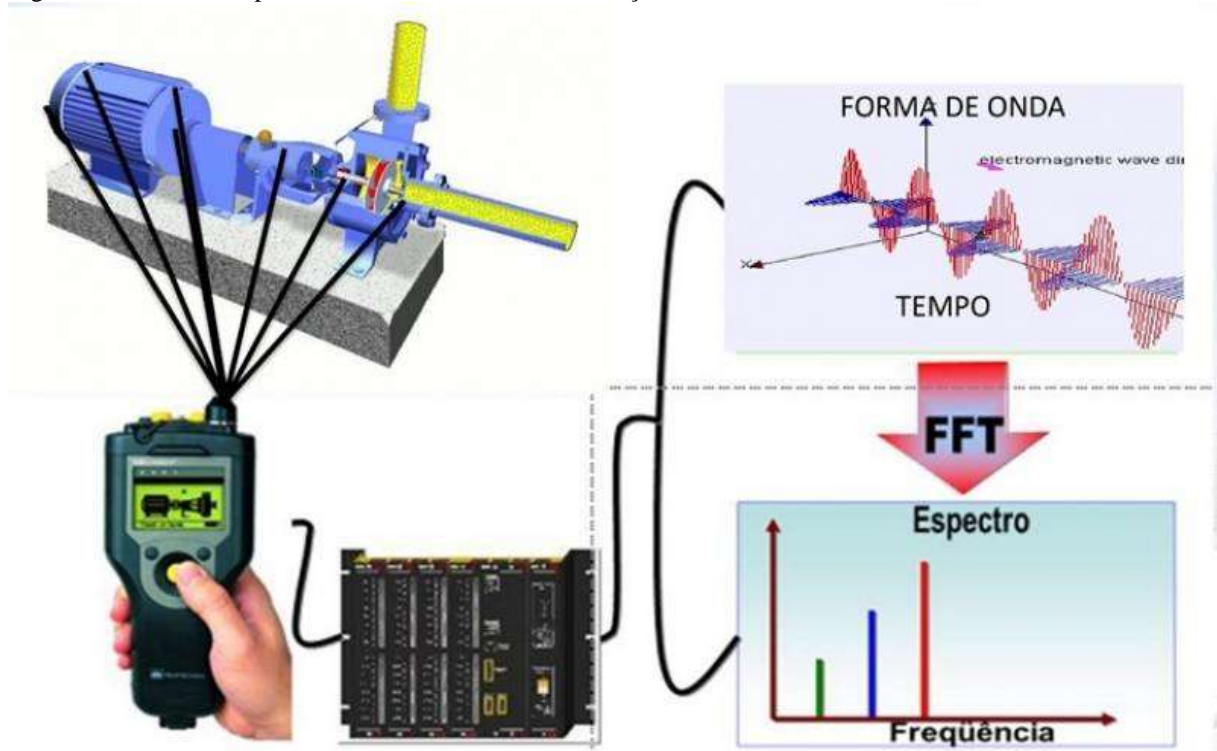
## **2.5 Análise espectral e os seus princípios**

Ao gerar o armazenamento do sinal em equipamentos que medem a vibração é possível verificar qualquer impulso seja não estável ou transitório. A análise deste sinal ou análise espectral consiste em uma representação gráfica da amplitude em função da frequência. Este espectro de frequência é utilizado como uma ferramenta para detectar a condição de funcionamento de máquinas industriais. Cada máquina apresenta sua característica de vibração, que é comandada por seus componentes, instalações e sistemas (RAO, 2008).

No gráfico gerado pode-se observar na abscissa a frequência e na ordenada a amplitude. A geração do espectro a partir da vibração é representada por picos que permite avaliar a variação da amplitude da vibração e discriminar os defeitos em desenvolvimento nos

componentes de uma máquina. O espectro “padrão” da máquina se configura como a “assinatura espectral” e representa a condição padrão na qual a máquina deve operar em condições normais e dentro dos padrões estabelecidos pelas normas técnicas. À medida que um ou mais componentes começam a falhar ocorre mudanças na frequência e amplitude da vibração e gerando alterações na assinatura espectral que ao ser interpretado representa que a máquina está operando de forma inadequada conforme demonstrado na figura 2 (MOUBRAY, 1999).

Figura 2: Análise de espectro de diferentes níveis de vibração



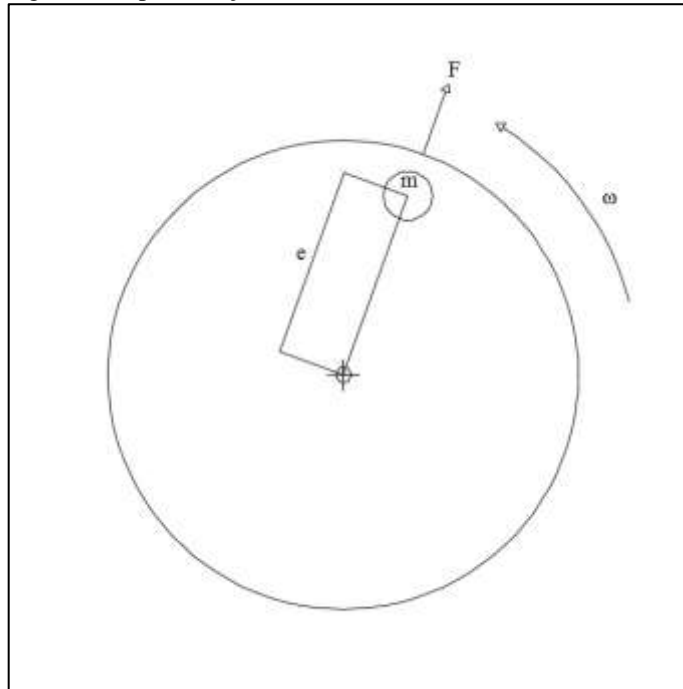
Fonte: Termovibra, análise de manutenção preditiva

## 2.6 Vibrações de origem mecânica

Uma das fontes de alteração das vibrações é o desbalanceamento de rotores estando diretamente ligado ao desequilíbrio de massas estando relacionado às seguintes causas como; assimetrias, deformações, imperfeições na matéria prima e erros na montagem da peça. O surgimento de pelo menos um destes efeitos ocasionam o desarranjo a distribuição perfeita de massa que gera o desbalanceamento (Figura 3). Cada uma destas causas citadas ocasiona modificações no centro de gravidade da seção transversal. Quando ocorre a combinação destes efeitos gera um desvio ou afastamento do eixo principal de inércia em relação ao eixo

de rotação. Então, o rotor terá uma distribuição desigual de massa ao redor do eixo de rotação gerando o efeito de vibração (LIMA, 2014).

Figura 3: Representação de massa desbalanceada



Fonte: O autor (2018).

A força que causa o desbalanceamento pode ser calculada pela fórmula 1:

$$F = m.e.\omega^2 \quad (1)$$

Sendo que  $\omega$  é dado pela fórmula 2 :

$$\omega = [(2\pi.\text{rpm}/60)^2] \quad (2)$$

Onde:

F= força centrípeta [N]

m= massa desbalanceada [Kg]

e= raio, do centro do disco até o centro da massa desbalanceada [m]

rpm= rotação do motor

$\omega$  = velocidade angular [rad/s]

Outra fonte de alteração da vibração mecânica é o desalinhamento de eixos. O desalinhamento é um efeito comum em diferentes áreas de operações industriais ocorrendo quando os eixos de rotação de duas máquinas não estão concêntricos entre si. Estas desconformidades acabam alterando o modo de funcionamento do sistema ocasionando prejuízos. As causas deste efeito são montagens inadequadas, alinhamento impreciso, desgaste de mancais e rolamento e expansões térmicas. Os efeitos causados pelo desalinhamento são os níveis de vibrações aumentar, desgaste excessivo dos mancais e aumenta o consumo de energia (LIMA, 2014).

O eixo empenado é causa frequente de alteração da vibração, sendo confundido com o desbalanceamento e desalinhamento. O empenamento de eixos é estável no tempo e variação com a rotação do motor. Somente o balanceamento e alinhamento não são eficazes para a correção do problema sendo necessário o “desempeno do eixo” (LIMA, 2014).

O defeito em rolamento também é outra causa de alteração da vibração. Os rolamentos são peças importantes em máquinas que usam o eixo de rotação para transmitir o movimento. Ao apresentar defeitos nestas peças podem evoluir vagarosamente e emitem sinais de deterioração com antecedência antes de apresentar a falha final. Ao apresentar a falha final pode ter o travamento ou ruptura dos componentes (NERY, 2008).

As folgas mecânicas são quando há um espaço livre entre as partes rotativas e fixas. Quando esta folga é maior que o previsto provavelmente ocorrerá problemas, podendo ter afrouxamento entre partes estacionárias como caixa de mancal, base e o pé de apoio. A ocorrência desta falha pode ser evidenciada pelo espectro no gráfico gerado (LIMA, 2014).

Por fim, o roçamento também é outra causa de alteração nos níveis de vibração. O roçamento ocorre quando há contato entre partes fixas e girantes da máquina, gerando vibrações. Quando faz a análise do espectro de vibração visualizam-se muitos casos facilmente a caracterização do roçamento. Ocorre em diversos locais do eixo como: mancais e carcaça (LIMA, 2014). Além destas causas também pode ocorrer por falhas de origem elétrica.

## **2.7 Frequência natural, ressonância e transmissibilidade**

Frequência natural consiste em uma taxa de oscilação livre da estrutura, após cessar a força que induziu o seu movimento. Esta frequência depende exclusivamente da massa e rigidez do sistema e qualquer propriedade altera o valor. A fórmula 3 tem a finalidade de calcular a frequência natural (BEZERA et al, 2014).

$$\omega_n^2 = K/m \quad (3)$$

Onde:

$K$ =rigidez equivalente do sistema [N/m];

$m$ = massa do equipamento [Kg];

$\omega_n^2$ = frequência natural [rad/s].

Há inúmeros sistemas na natureza que podem oscilar em uma posição de equilíbrio, por exemplo: pontes, cordas do violão, membrana do tambor, os elétrons em uma antena, átomos nos sólidos, entre outros. Em sistemas estas oscilações são amortecidas normalmente, ou seja, desaparecem com o tempo se nenhum estímulo externo for aplicado (BEZERA et al, 2014).

A fórmula 4 é utilizada para calcular a frequência de excitação ou frequência de operação do equipamento.

$$\omega = (\text{rpm} \cdot 2\pi) / 60 \quad (4)$$

Onde:

$\omega$ : frequência de operação [rad/s].

A amplificação dinâmica acontece quando existe uma frequência de excitação. A relação da frequência de operação e da frequência natural indicada pela formula 5, determina define a variação do coeficiente de amplitude (RAO, 2010).

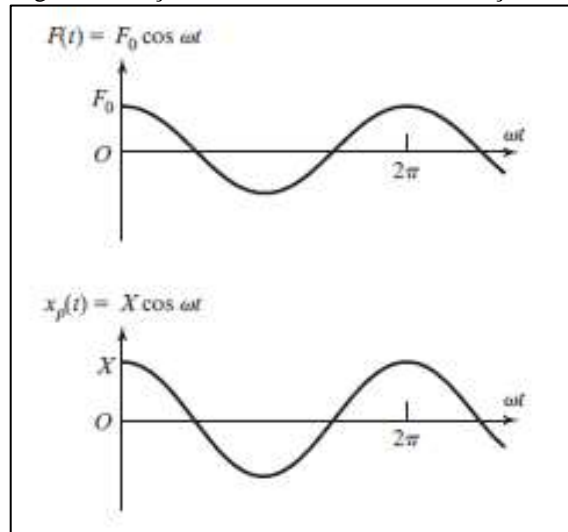
$$r = \omega / \omega_n \quad (5)$$

Uma vez que  $r$ : razão entre as frequências.

A resposta harmônica à força de excitação esta relacionada diretamente ao  $r$ .

Quando  $0 < r < 1$ :

Figura 4: Força harmônica em fase com a força de excitação



Fonte: (RAO, 2010).

A força harmônica de resposta esta em fase com a força de excitação, e é calculada pela fórmula 6.

$$\frac{X}{\delta_{st}} = \frac{1}{1 - \left(\frac{\omega}{\omega_n}\right)^2} \quad (6)$$

Sendo a formula 7 complemento da fórmula 6.

$$\delta_{st} = F_0/k \quad (7)$$

Onde:

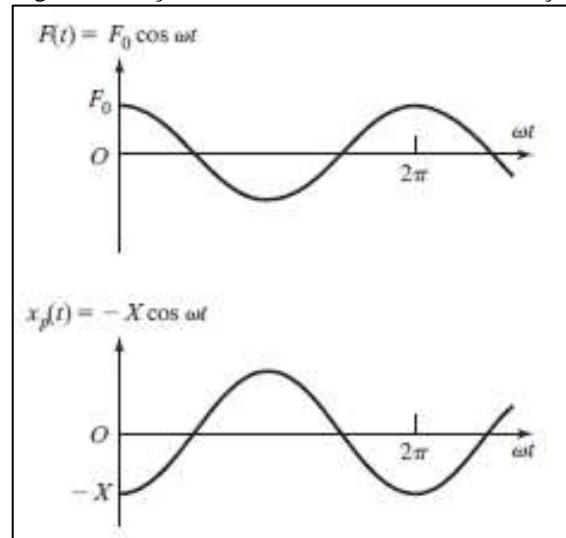
$\delta_{st}$ : Deflexão elástica [m];

X: Amplitude de deslocamento [m];

Fo: Amplitude da força [N].

Quando  $r > 1$ :

Figura 5: Força harmônica em fase contrária a força de excitação



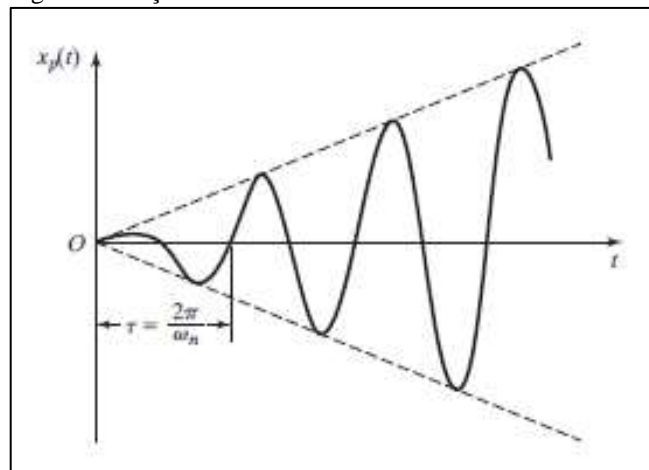
Fonte: (RAO, 2010).

A força harmônica de resposta esta em fase contrária à força de excitação é calculada pela fórmula 8.

$$X = \frac{\delta_{st}}{1 - \left(\frac{\omega}{\omega_n}\right)^2} \quad (8)$$

Quando  $r=1$ :

Figura 6: Força harmônica em ressonância



Fonte: (RAO, 2010).

A força harmônica de resposta esta em ressonância, e é calculada pela fórmula 9.

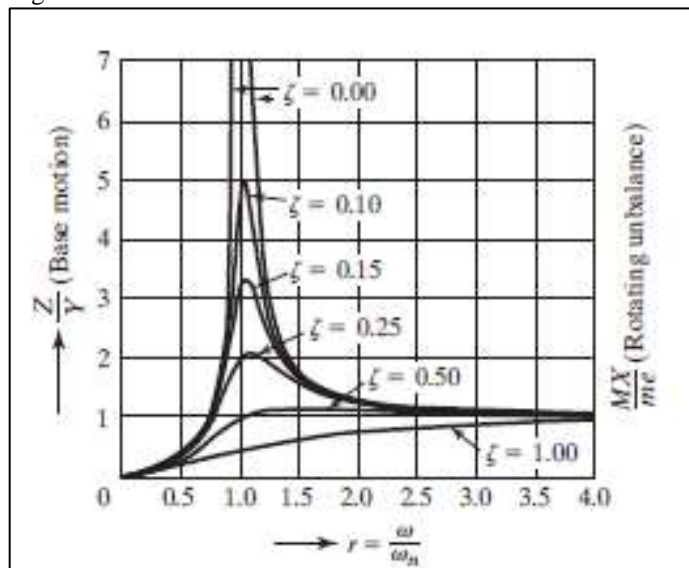


$$\frac{X}{\delta_{st}} = \frac{1}{1 - \left(\frac{\omega}{\omega_n}\right)^2} \quad (9)$$

A ressonância ocorre quando a frequência da força de excitação coincide com uma das frequências naturais não amortecidas do sistema. Portanto, a amplitude do movimento aumenta progressivamente mesmo tendo um mínimo de excitação imposta (BEZERA et al, 2014).

Uma força é transmitida para a base ou suporte devido a fatores de amortecimento que é característico de cada material. A variação da força transmitida esta relacionada com a relação das frequências  $r$ , que quando esta em ressonância diminui o fator de amortecimento e aumenta a transmissão de força para a base de fixação (RAO, 2010), como demonstrado na figura 7.

Figura 7: Transmissibilidade



Fonte: (RAO, 2010).

A amplitude da força máxima transmitida para base pode ser calculada pela fórmula 10.

$$\frac{X}{Y} = \left\{ \frac{1 + (2\zeta r)^2}{(1 - r^2)^2 + (2\zeta r)^2} \right\}^{1/2} \quad (10)$$

Onde  $\zeta$  = fator de amortecimento

Na maioria dos casos este fenômeno não é bem-vindo, como por exemplo, de estruturas civis, quando ocorre à ressonância podem ocorrer pequenos esforços externos provocando deslocamentos significativos tornando perceptível e induzindo um desconforto nos usuários. Já em motores este fenômeno pode causar danos ao sistema uma vez que quando há estas condições o sistema trabalha em níveis de sollicitação mecânica máxima tendo como consequência a redução do tempo de vida útil dos elementos associados ao sistema (BEZERA et al, 2014).

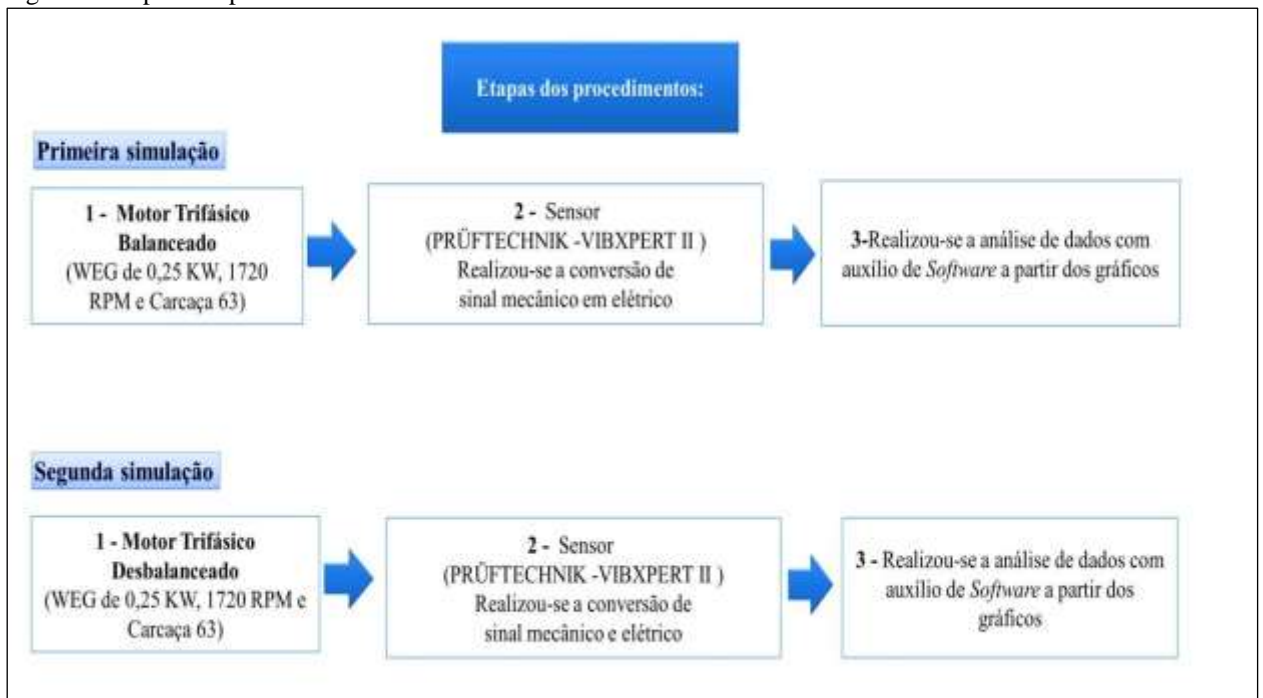
### 3 MATERIAL E MÉTODOS

A seguir serão apresentados os materiais e métodos realizados neste trabalho a partir da técnica de análise de vibração.

#### 3.1 Delineamento experimental

Na figura 8 demonstra de forma resumida o delineamento experimental realizado neste estudo.

Figura 8: Etapas dos procedimentos realizados



Fonte: O autor (2018).

#### 3.2 Análise de vibração por variação de frequência em motor trifásico balanceado

Para a realização da análise de vibração por variação de frequência em motor trifásico da marca WEG de 0,25 KW, 1720 RPM e Carcaça 63 com dois discos de nylon (Figura 9) acoplados ao seu eixo, um em cada extremidade juntamente com um inversor de frequência da marca YASKAWA do modelo V1000.

Figura 9: Discos do motor trifásico



Fonte: O autor (2018).

Os testes foram realizados na seguinte maneira:

Foi analisado primeiramente o motor balanceado colocando o sensor do analisador de vibração da marca PRÜFTECHNIK modelo VIBXPERT II (figura 10) na tampa lateral do motor trifásico paralelamente ao seu rolamento. Após o motor ligado, foi realizada uma variação de 10 a 60 Hz e coletado os níveis de vibração passando de Hz a Hz. A partir deste teste (Run Up) foi possível identificar a frequência natural do motor gerando um gráfico no qual demonstra a rotação em RPM e valor (da Vibração em velocidade RMS, dada em mm/s) Médio Quadrático (VRMS).

Figura 10: PRÜFTECHNIK - VIBXPERT II



Fonte: Pruftechnik

### 3.3 Procedimento de desbalanceamento

O motor trifásico utilizado neste experimento contém dois discos de nylon em cada extremidade de seu eixo. Nos discos contem vários furos roscáveis, que foram utilizados para adicionar uma massa para simular o desbalanceamento na bancada (Figura 11).

Figura 11: Motor desbalanceado



Fonte: O autor (2018).

Aos discos foram adicionados duas arruelas e dois parafusos idênticos, um em cada disco afim de simular o desbalanceamento. Os dois parafusos foram colocados com o alinhamento nos dois discos.

### 3.4 Análise de vibração por variação de frequência em motor trifásico desbalanceado

Para a realização da análise de vibração por variação de frequência em motor trifásico desbalanceado este procedimento foi realizado conforme a técnica descrita no item 3.2. Fez-se a identificação do defeito de desbalanceamento por meio da análise do sinal de vibração. O defeito de desbalanceamento pode ser caracterizado por meio da análise espectral, seguindo alguns pontos característicos do sinal: vibração e amplitude.

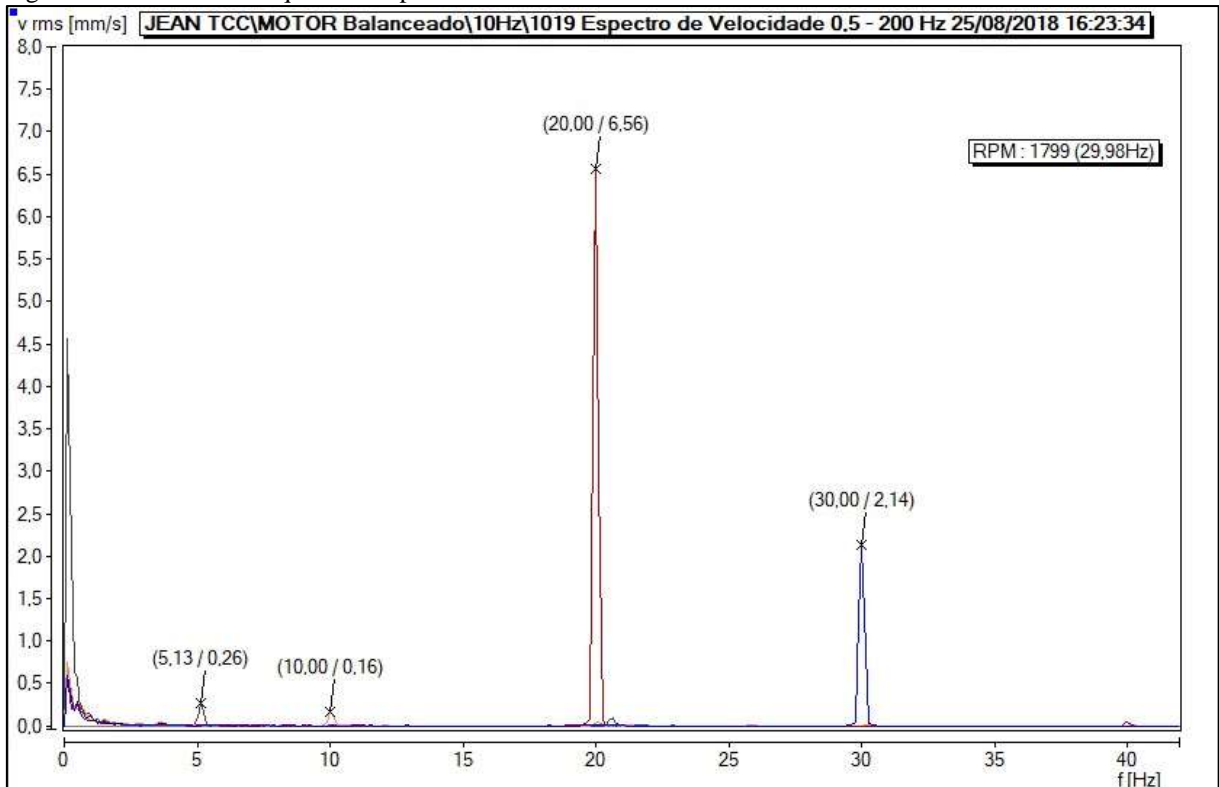
### **3.5 Interpretação da análise de vibração em motor trifásico balanceado e desbalanceado**

A partir dos gráficos gerados pelo software da marca PRÜFTECHNIK foi possível analisar a amplitude dos espectros de vibração nas diferentes frequências geradas pelo inversor.

## 4 RESULTADOS

A figura 12 demonstra que foram realizados testes com frequências específicas em motor balanceado para detectar o nível de vibração nestes pontos como observados no gráfico. Os resultados obtidos foram, que inicialmente o ponto 0 quando o motor entra em rotação existe um pequeno pico decorrente de o conjunto rolante estar em inercia. Logo após, foi feito uma medição na frequência de 10 Hz do inversor de frequência, a frequência analisada é a de rotação que é metade da frequência do inversor, então na frequência de 5 Hz observa-se uma amplitude de vibração de 0,26 mm/s. Posteriormente foi realizado uma medição na frequência de 10 Hz e nota-se uma amplitude de vibração de 0,16 mm/s. Então, foi medido na frequência de 20 Hz e observou-se um pico máximo de amplitude de vibração de 6,56 mm/s neste caso sugere-se que esta é a frequência natural. Por fim, fez-se uma medição da frequência de 30 Hz e obteve-se uma amplitude de vibração de 2,14 mm/s. Dessa forma, nota-se que nas frequências de (5,10 e 30 Hz) as amplificações foram menores, pois a frequência de operação esta distante da frequência natural.

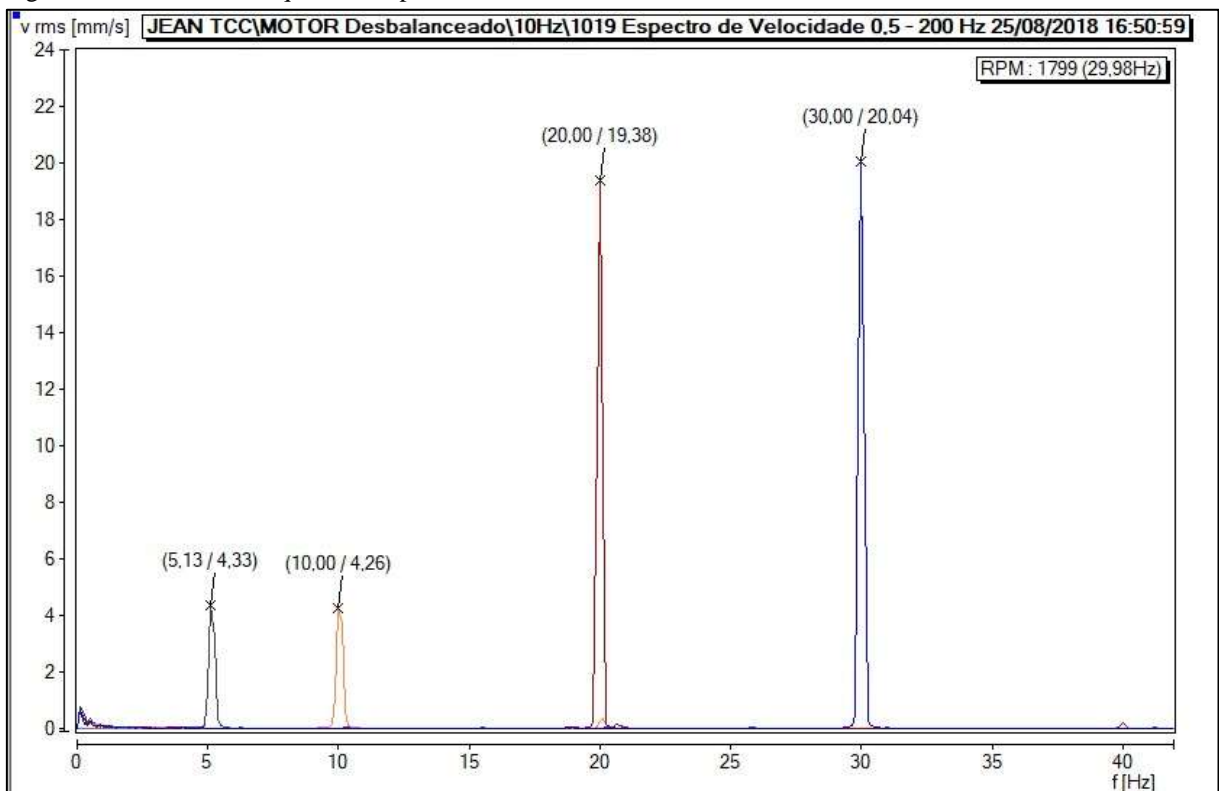
Figura 12: Testes com frequências específicas em motor trifásico balanceado



Fonte: O autor (2018).

Já na figura 13 demonstra que foi realizado testes com frequências específicas em motor desbalanceado para detectar o nível de vibração nestes pontos como observados no gráfico. No início da medição houve uma pequena oscilação no nível de amplitude decorrentes do motor estar em inercia. Primeiramente fez-se a medição na frequência em 5 Hz e tendo-se uma amplitude de vibração de 4,33 mm/s. Em seguida realizou-se a medição na frequência de 10 Hz e obteve uma amplitude de vibração de 4,26 mm/s. Fez-se também a medição em 20 Hz e observou-se uma amplitude de vibração de 19,38 mm/s. Por fim, fez-se a medição da frequência de 30 Hz e a amplitude de vibração de 20,04 mm/s. A partir destes dados infere-se que em todas as medições as amplitudes de vibração foram maiores do que em um motor balanceado notando-se que após passar pela frequência natural os níveis de vibração continuam muito alto devido a massa desbalanceada do disco.

Figura 13: Testes com frequências específicas em motor trifásico desbalanceado



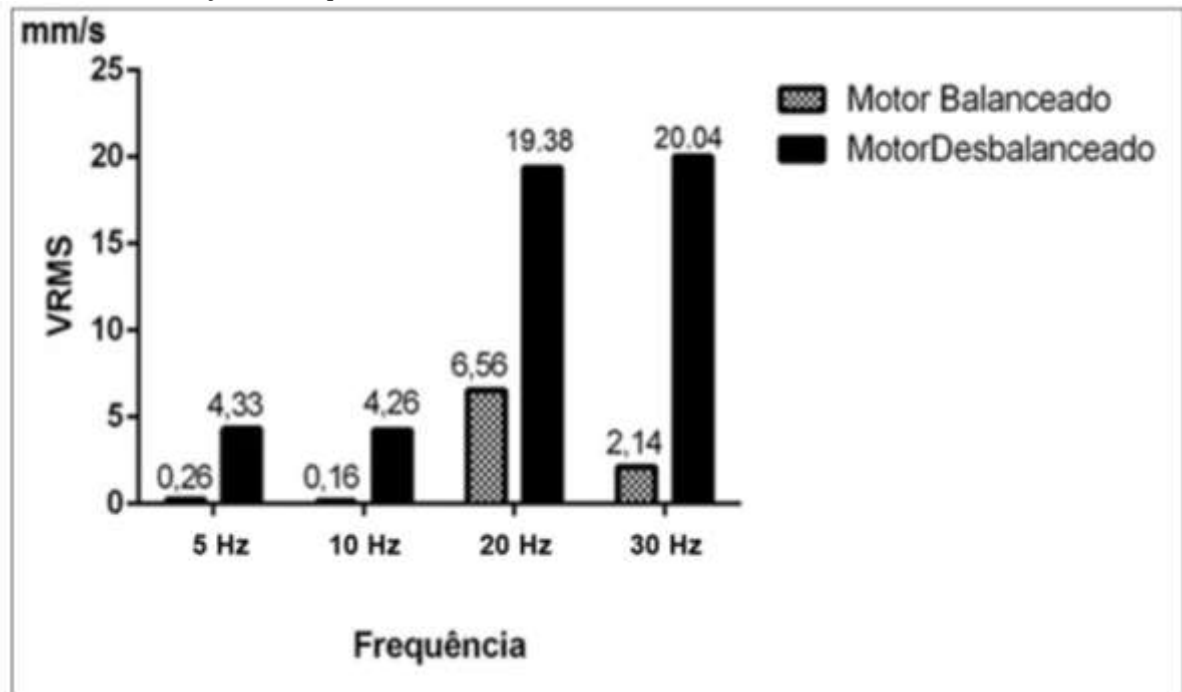
Fonte: O autor (2018)

No gráfico 1 demonstra-se a correlação entre os dados obtidos de motor balanceado e desbalanceado, no qual observa-se diferentes amplitudes de acordo com a frequência de operação. É possível entender que quando a ressonância ocorre a amplitude é máxima no motor balanceado, porém no motor desbalanceado a força gerada pela distribuição desigual da massa está ligada diretamente com a rotação do motor, sendo assim quanto maior a rotação



maior será a amplitude. Desta forma, mesmo que a frequência de operação não coincida com a frequência natural do motor a amplitude se torna elevada.

Gráfico 1: Correlação das frequências em motor trifásico balanceado e desbalanceado



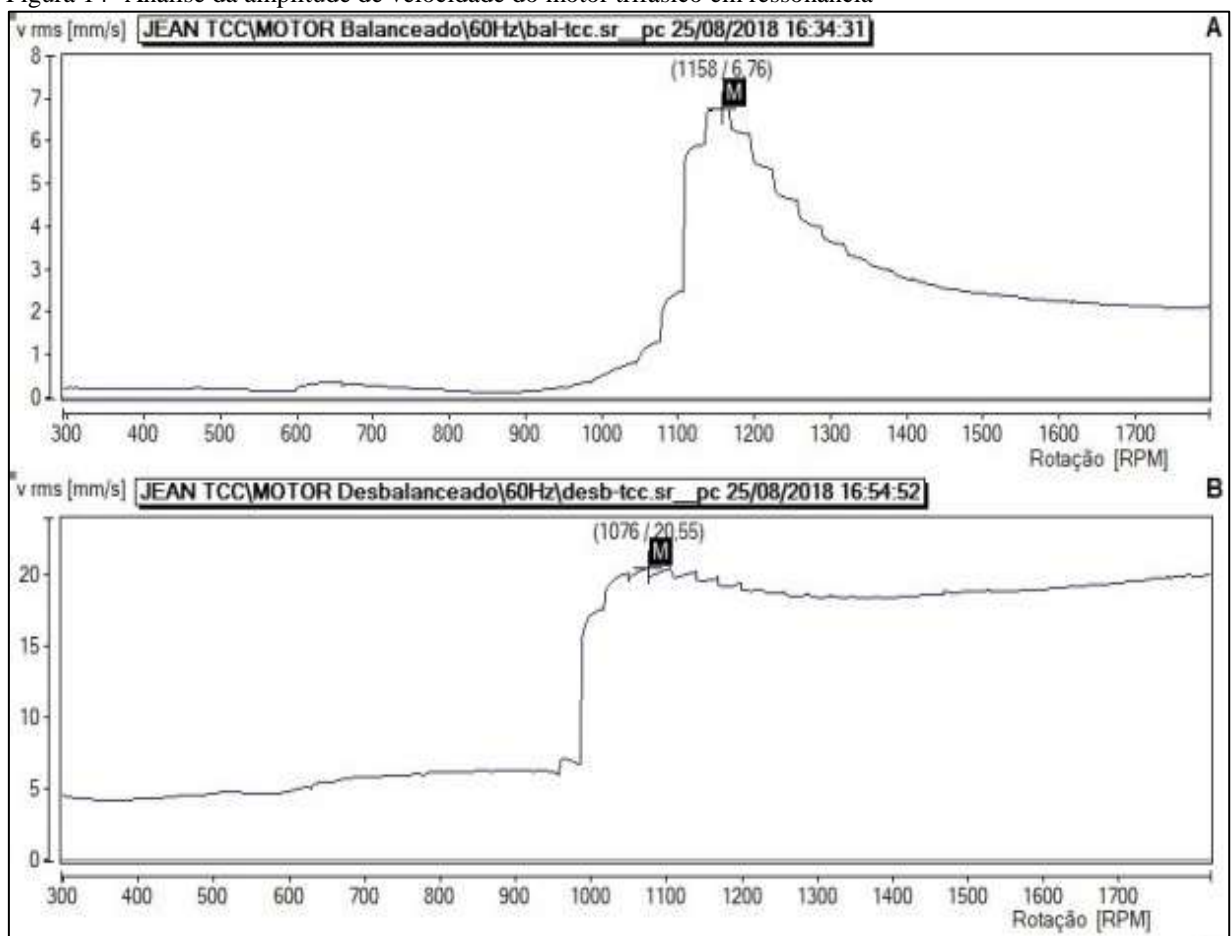
Fonte: O autor (2018).

A figura 14A e 14B representa os dados obtidos através análise de vibração utilizando o teste de *run up*. Os resultados da figura 14A foram obtidos do motor balanceado. Entre as rotações de 300 a 1000 rpm a amplitude não houve alterações significativas, porém no intervalo de 1001 a 1300 rpm observa-se um aumento significativo na amplitude, sendo seu pico em 1158 rpm com 6,76 mm/s, com uma frequência de rotação de 19,3 Hz. Verificando estes dados pode-se deduzir que o pico indicado no gráfico é onde está localizada a frequência natural do conjunto, que está relacionado a rigidez no eixo de menor momento de inércia da estrutura do motor, e com a massa do motor, pois quando a frequência de operação coincide com a frequência natural do motor ele tende a entrar em ressonância.

Na figura 14B os resultados foram obtidos após o desbalanceamento do motor. Nota-se que entre as rotações de 300 a 950 rpm houve um aumento considerável na amplitude variando em aproximadamente 5 mm/s. A partir de 951 rpm observa-se um aumento na amplitude no gráfico sendo que o pico está em 1076 rpm com amplitude de 20,55 mm/s, com uma frequência de rotação de 17,9 Hz.

No motor desbalanceado em baixas rotações até 950 rpm verifica-se que a amplitude de desbalanceamento é em torno de 5 mm/s. Comparando ao motor balanceado onde o pico de desbalanceamento é de 6,76 mm/s os níveis de vibração já se encontram em um estado crítico. No motor desbalanceado após 950 rpm que é próximo a rotação que coincide com a frequência natural do motor a amplificação da amplitude é de aproximadamente de 60% comparando ao motor balanceado. Desta forma, pode-se sugerir que acarretará em um desgaste prematuro dos componentes.

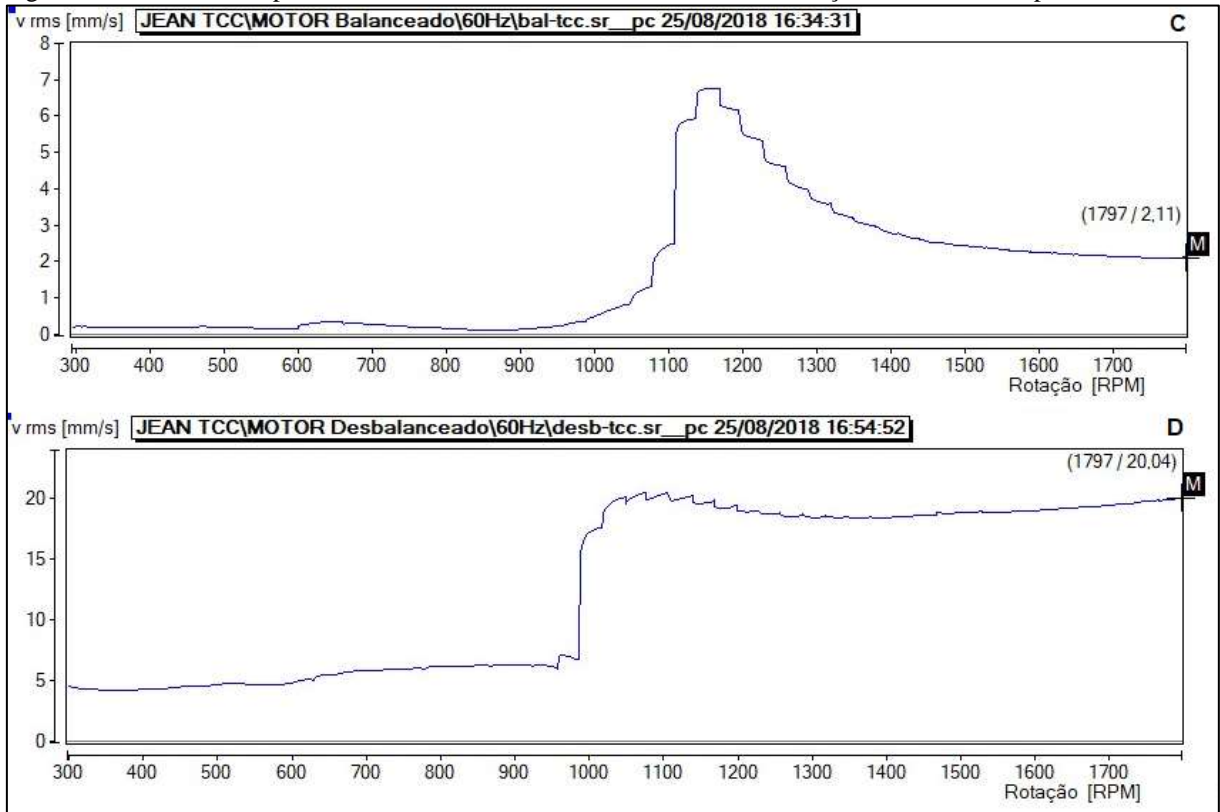
Figura 14- Análise da amplitude de velocidade do motor trifásico em ressonância



Fonte: O autor (2018). Legenda: A – Motor balanceado. B- Motor Desbalanceado.

Os resultados da figura 15C e 15D representa a amplitude de vibração do motor em sua rotação máxima de 1800 rpm. A figura 15C representa o motor balanceado, observando uma amplitude de VRMS de 2,11 mm/s. Já na figura 15D que representa o motor desbalanceado nota-se uma amplitude de VRMS de 20,04 mm/s.

Figura 15: Análise da amplitude de velocidade do motor trifásico em sua rotação máxima 1800 rpm



Fonte: O autor (2018). Legenda: A – Motor balanceado. B- Motor Desbalanceado.

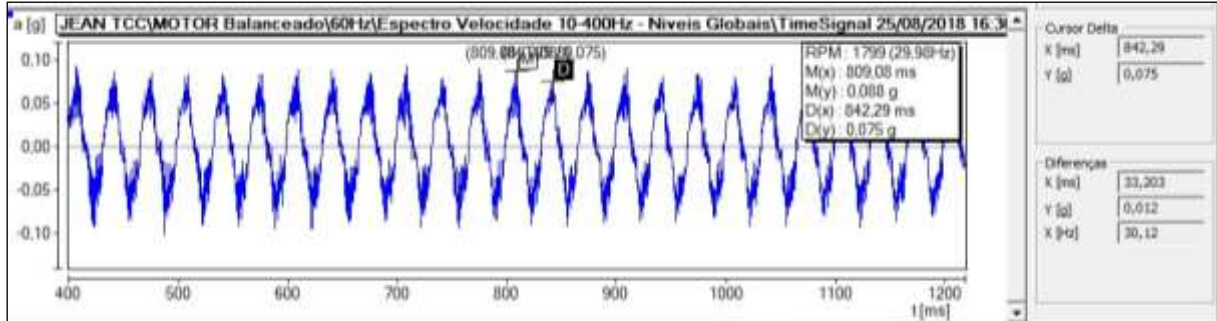
Na tabela 1 observa-se os resultados encontrados nas figuras anteriormente descritas. Na figura 14A e 14B indica que a ressonância se encontra próxima a rotação de 1117 rpm o valor de desbalanceamento no motor desbalanceado é aproximadamente 3 vezes maior que no motor balanceado. Na figura 15C onde a rotação do motor é máxima observa-se um desbalanceamento de 2,1 mm/s o que é 3 vezes menor comparado aos níveis de vibração do motor balanceado em sua ressonância. A figura 15D indica o motor desbalanceado em sua rotação máxima, com uma desbalanceamento de 20,4 mm/s o que é próximo a amplitude da frequência natural do motor em desbalanceamento. Este fato ocorre pela força gerada pelo desbalanceamento, onde a massa pontual é diretamente relacionada à rotação do motor, portanto a amplitude é elevada decorrente a rotação elevada.

Tabela 1: Valores do espectro do motor			
FIGURA	CONDIÇÃO	ROTAÇÃO	VRMS
14A	BALANCEADO	1158 RPM	6,76 mm/s
14B	DESBALANCEADO	1076 RPM	20,55 mm/s
15C	BALANCEADO	1797 RPM	2,11 mm/s
15D	DESBALANCEADO	1797 RPM	20,4 mm/s

Fonte: O autor (2018).

Na figura 16 é possível observar o espectro de velocidade do motor balanceado em 30 Hz. Os dados representam uma onda no tempo em função da aceleração. Em um período de 33,21 ms a aceleração média é de 0,0815g.

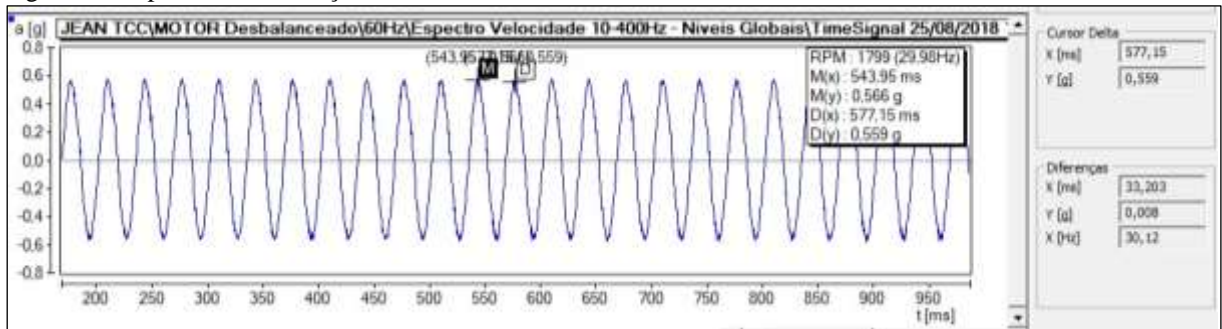
Figura 16: Espectro de aceleração do motor trifásico balanceado em 30 Hz



Fonte: O autor (2018).

Já na figura 17 também é possível observar o espectro de velocidade do motor, mas em um motor desbalanceado em 30 Hz. Os resultados representam uma onda no tempo em função da aceleração. Ao analisar em um período de 33,25 ms da aceleração média foi de 0,563g.

Figura 17: Espectro de aceleração do motor trifásico desbalanceado em 30 Hz

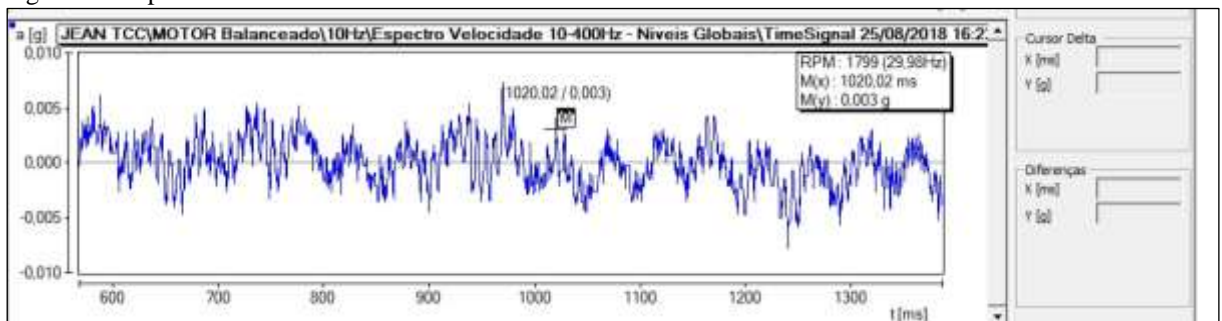


Fonte: O autor (2018).

Ao comparar os resultados obtidos das figuras 16 e 17 a amplitude da senoide de aceleração no motor balanceado é menor se comparado ao motor desbalanceado. Desta forma, isto pode resultar em maiores níveis de vibração no motor desbalanceado.

Quando observamos o espectro de velocidade em baixa frequência (5 Hz) como demonstrado na figura 18 em um motor balanceado o gráfico não se resulta em uma onda no tempo. Assim demonstrando que a força de aceleração é basicamente nula.

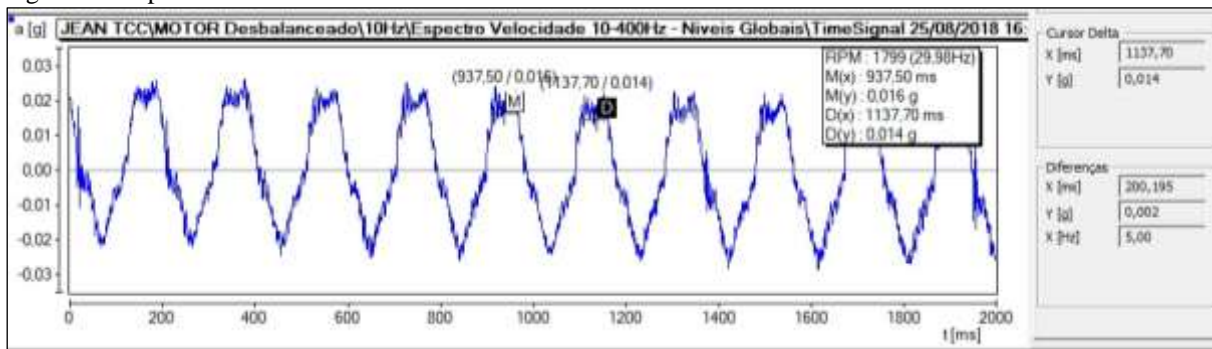
Figura 18: Espectro de velocidade em um motor trifásico balanceado em 5 Hz



Fonte: O autor (2018).

No motor desbalanceado (Figura 19) em um período de 200 ms obtém-se uma força de aceleração média de 0,015g que também é baixo para se ter uma vibração que causará impacto no motor.

Figura 19: Espectro de velocidade em um motor trifásico desbalanceado em 5 Hz



Fonte: O autor (2018)

Na tabela 2 representa os valores do espectro nas duas frequências de 30 e 5 Hz. Nela fica evidente a relação de que a frequência é inversamente proporcional ao tempo dado pela fórmula:

$$T = 1/F$$

Tabela 2: Valores do espectro de velocidade do motor trifásico.

CONDIÇÃO	FREQUÊNCIA	PERÍODO	ACELERAÇÃO
DESBALANCEADO	30 HZ	33,2 ms	0,563 g
BALANCEADO	30 HZ	33,2 ms	0,0815 g
DESBALANCEADO	5 HZ	200,2 ms	0,015 g
BALANCEADO	5 HZ	-	0,003 g

Fonte: Do autor (2018).

## 5 DISCUSSÃO

O motor trifásico é o mais utilizado em indústrias pela sua simplicidade de construção e baixa complexidade para manutenção.

Ao utilizarmos o motor trifásico neste estudo foi necessário realizar a simulação do desbalanceamento para avaliar os efeitos da vibração. Desta forma, foi realizada uma adição de massas nos discos acoplados ao eixo do motor, sendo elas idênticas. O valor da massa adicionada não foi levado em consideração devido que o propósito deste trabalho é o estudo dos efeitos do desbalanceamento e não a correção do mesmo.

Sobre os estudos de ressonância mecânica é essencial o conhecimento da frequência natural de cada equipamento para evitar que as vibrações geradas pela frequência de operação do motor não coincidam com a mesma. Uma vez que, quando há a incidência destas frequências o nível de vibração é amplificado e irá gerar desgastes em componentes como, por exemplo, (rolamentos, empenamento de eixo, desgaste na tampa do motor onde o rolamento é acoplado, aquecimento do motor e outros). Também pode haver rupturas por fadiga nos materiais que compõe os demais componentes da estrutura da máquina.

Conforme os resultados apresentados neste estudo o efeito do desbalanceamento eleva a degradação dos componentes que compõe o motor. Visto que, os índices de vibrações são elevados em todas as faixas de rotações. Quando a frequência de operação é a mesma da frequência natural do motor, ocorre a ressonância e os níveis de vibração são ainda mais altos pela amplificação dinâmica, e não se abaixam conforme ocorre quando com motor que está balanceado, pelo fato da força centrípeta gerada pelo desbalanceamento aumentar exponencialmente.

Na manutenção preditiva tanto na construção de equipamentos deve-se conhecer as vibrações do mesmo, a fim de evitar desgastes prematuros e futuras paradas indesejadas. A análise de vibração é a responsável por identificar as frequências de vibrações que são prejudiciais ao equipamento.

Nos resultados que foram apresentados o modelo de estudo foi de um motor isolado, porém quando este está acoplado em uma máquina que gera outras frequências de vibrações a análise deve ser interpretada cuidadosamente. Uma vez que, quando se tem diferentes níveis de rigidez e de massa cada componente tem suas frequências de naturais diferentes e, portanto, é necessário conhecer a amplitude e frequência de vibração de cada componente. As variações de tensão na rede de alimentação elétrica tanto quando o aterramento da máquina

pode interferir na interpretação dos dados. Sendo assim faz-se necessário levar em consideração todas estas variáveis.

Segundo Garcia, 2005 a análise de vibração tendo como base a amplitude versus frequência, que na maioria das vezes é adequadamente usada para identificar falhas em equipamentos rotativos, em casos específicos são necessárias informações adicionais, como por exemplo, o comportamento dinâmico de um equipamento dentro de condições específicas, pois alguns componentes mecânicos geram frequências idênticas. À análise do espectro de frequências ao tempo possui a vantagem de demonstrar uma resposta imediata da condição real da máquina. Desta forma, esta análise é crucial para determinadas circunstâncias.

Diante dos resultados encontrados por este estudo quando o motor entrou em ressonância o seu desempenho não foi alterado aparentemente. No entanto, a partir dos resultados observados, é perceptível que existe uma amplificação no nível de vibração. Com o passar do tempo se o motor permanecer nesta frequência, os seus componentes terão sua vida útil reduzida.

Para um motor que está desbalanceado o nível de vibrações sofre uma alteração ainda maior, e neste caso a uma perda de eficiência do motor, pois se gera uma força paralela ao movimento de rotação, isto demanda uma potência extra do motor. Então se faz necessário utilizar a análise de vibração para que tenha maior durabilidade dos componentes do motor e de uma máquina de modo geral, mesmo que não tenha alterações em seu desempenho, mas que seja possível reduzir gastos no setor de manutenção e paradas indesejadas em uma rotina de trabalho.

Em estruturas onde são fixados os motores e os mesmos sejam de alguma forma obrigados a trabalhar em uma frequência de ressonância, pode se fazer alterações na estrutura, a fim de evitar a degradação da mesma. Dois fatores que são ligados diretamente com a frequência natural é a massa do conjunto e a rigidez do material. Alterando estes valores a frequência natural do equipamento é mudada, fazendo que não ocorra mais a ressonância. A forma mais simples é a variação da rigidez, que pode ser alterada mediante cálculos, observando se a necessidade é de aumento ou diminuição da mesma, onde cada caso em específico tem que ser analisado criteriosamente.

A transferência da vibração pode ser atenuada quando se muda o fator de amortecimento de fixação do equipamento, podendo ele passar por frequência de ressonância e mesmo assim a transmissibilidade de força de vibração também ser baixa. O fator de amortecimento reduz a transferência de vibração para a base de fixação, porém não reduz a força gerada pela excitação ou pelo desbalanceamento.



## 6 CONCLUSÃO

Com o crescente mercado tecnológico, todo o meio produtivo demanda de alta eficiência rapidez e confiabilidade na produção de bens de consumo. Visto que o motor é um dos principais itens em uma indústria e é notório que ele receba uma atenção especial. Para que ele mantenha seu funcionamento pleno, a manutenção preventiva não é o suficiente para garantir sua total disponibilidade. Neste cenário a manutenção preditiva tem um papel essencial, visto que, com análises de alta confiabilidade como a análise de vibração, ela detecta e previne paradas indesejadas com manutenções corretivas.

As análises mais utilizadas para detecção destas falhas são as vibracionais. Com os equipamentos tecnológicos cada dia mais avançados, estes resultados são muito confiáveis, e também a facilidade para fazer os testes, sendo que os aparelhos são em sua maioria portáteis, o que facilita a tarefa do departamento de manutenção. Com os testes em campo é possível detectar se é necessário ou não a intervenção direta no equipamento, evitando desmontagens desnecessárias.

A partir dos resultados encontrados conclui-se que foi possível identificar a frequência natural do motor. Desta forma, quando foi aplicada uma frequência que coincidiu com a frequência natural este entrou em ressonância. O efeito da ressonância foi ainda mais intenso quanto simulou o desbalanceamento do motor, pois a força centrípeta gerada pela massa desbalanceada aumenta exponencialmente com o aumento da rotação. Sendo assim, é possível concluir que se faz necessário evitar que o motor trabalhe em uma frequência que coincida com a frequência natural justamente para não entrar em processo de ressonância.

Também é muito importante que o motor e acoplamentos não esteja desbalanceados, pois tal efeito intensifica os níveis de vibrações e como consequência ocorrem maiores defeitos nos motores.

Desta forma, uma das alternativas para o setor industrial é que os investimentos em equipamentos para análises de manutenção preditiva se fazem muito importante, pois evitam trocas desnecessárias de peças nos motores e reduz o tempo de máquina parada e principalmente aumenta a vida útil dos equipamentos e toda estrutura onde estão fixados.

## REFERÊNCIAS

ANDRADE, D. R. R. de et al. Termografia aplicada na manutenção preditiva de sistemas elétricos. **RIT-Revista Inovação Tecnológica**, São Paulo, v. 5, n. 1, p. 85-106, 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5462**: confiabilidade e manutenibilidade: Rio de Janeiro, 1994. 37 p.

BELLINI, A. et al. Advances in diagnostic techniques for induction machines. **IEEE Transactions on Industrial Electronics**, Greenfield, v. 12, n. 55, p. 4109-4126, 2008.

BEZERRA, I. S. et al. **Ressonância em uma viga engastada sob um carregamento harmônico periódico**. XX Seminário de Iniciação Científica da UFERSA, 2014.

CAVALCANTE, P. F.; JESUS, S. S. Utilização de bancadas de ensaio para estudo do comportamento dinâmico de máquinas rotativas-vibrações mecânicas. **Holos**, Natal, v. 3, p. 18-40, 2011.

ELETROBRÁS/PROCEL. In REVIMAQ. **A evolução na eficiência energética de motores elétricos**. Artigo publicado em: 30/01/2015. Disponível em: <<http://www.revimaq.com/noticia/a-evolucao-na-eficiencia-energetica-de-motores-eletricos>> Acesso em: 24 junho 2018.

FRANÇA, Luis Novaes Ferreira; SOTELO JUNIOR, José. **Introdução às vibrações mecânicas**. 1.ed. São Paulo: Edgard Blucher, 2013.

FLUKE. Introdução aos princípios da termografia. Ed. ATP, 2009.

GARCIA, M.S. **Análise de defeitos em sistemas mecânicos rotativos a partir da monitoração de vibrações**. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio Janeiro, 2005.

GONÇALVES NETO, W. et al. Manutenção preditiva através de análises em equipamentos rotativos monitorado por sensores de vibração. **Revista de Controle e Automação**, Campinas, v. 1, n. 1, p. 1-8, 2013.

GONÇALVES, José Ernesto Lima. **Os impactos das novas tecnologias nas empresas prestadoras de serviços**. Artigo publicado na Revista de Administração de Empresas. São Paulo, v. 34, n. 1, p. 63-81 Jan./Fev. 1994. Disponível em: <<http://www.scielo.br/pdf/rae/v34n1/a08v34n1>> Acesso em 24 junho 2018.

GONGORA, W. S. et al. Neural approach to fault detection in three-phase induction motors. **IEEE Latin America Transactions**, New York, v. 14, n. 3, p. 1279-1288, 2016.

HOLANDA, Sandra Maria Santos; ROLIM, Tiago Leite. **Aplicação da manutenção preditiva por análise de vibrações em equipamentos de trens urbanos com plano de manutenção proposto**. 2016. 96f. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Pernambuco, Pernambuco, 2016.

IMMOVILLI, F. et al. Diagnosis of bearing faults in induction machines by vibration or current signals: a critical comparison. **IEEE Transactions on Industry Applications**, New York, v. 46, n. 4, p. 1350-1359, 2010.

ISO 10816-8, Mechanical Vibration - Evaluation of machine Vibration by measurements on non-rotating Part 8: Reciprocating compressor systems, 2014.

KARDEC, Alan; NASCIF, Júlio. **Manutenção: Função Estratégica**. 3.ed. Rio de Janeiro: Qualitymark: Petrobras, 2009.

LIMA, Israel Antônio Macedo de; NUNES, Maria Alzira de Araújo. **Proposição de uma bancada didática para análise de vibração em manutenção preditiva**. 2014. 103f. Monografia (Graduação) – Universidade de Brasília Faculdade do Gama, Brasília, 2013.

MOUBRAY, John. RCM – **Reliability Centered Maintenance**. Ed. SQL Brasil –2.ed. 1999.

Nery, R.T.C. Desenvolvimento de uma ferramenta virtual para análise de vibração em máquina rotativa: aplicação em bancada didática. 2008. Monografia (Graduação) - Universidade Federal do Pará, Belém.

PRUFTECHNIK VIBXPERT-II: <https://www.pruftechnik.com/br/produtos/sistemas-condition-monitoring/equipamentos-de-medicao-portateis-para-condition-monitoring/vibxpert-ii.html>. Acesso em: 23 setembro 2018.

RAO, Singiresu S. **Mechanical Vibrations**. 4.ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2008.

RAO, Singiresu S. **Mechanical Vibrations**. 5 th.ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2010.

SEQUEIRA, C. Sensores para medições de vibrações mecânicas-acelerómetros. **Revista Manutenção**, Porto, v. 116, p. 4-6, 2013.

TERMOVIBRA, ANÁLISE DE MANUTENÇÃO PREDITIVA: Disponível em: <http://www.termovibra.com.br/termografia/analises-de-vibracao/analise-de-vibracao-em-motores-diesel/analise-de-vibracao-de-motores-eletricos-jandira>. Acessado em 30 de setembro de 2018.