



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

ELTON CÉSAR DE LIMA ALMEIDA

**ANÁLISE DO IMPACTO DAS VIBRAÇÕES MECÂNICAS DE
MÁQUINAS ROTATIVAS NO CONSUMO DE ENERGIA ELÉTRICA**

RECIFE
2025

ELTON CÉSAR DE LIMA ALMEIDA

**ANÁLISE DO IMPACTO DAS VIBRAÇÕES MECÂNICAS DE
MÁQUINAS ROTATIVAS NO CONSUMO DE ENERGIA ELÉTRICA**

Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação em Engenharia Mecânica do Centro de Tecnologia e Geociências da Universidade Federal de Pernambuco como requisito para a obtenção do título de Engenheiro Mecânico.

Orientador: Prof. Dr. Eng. Carlos Augusto do Nascimento Oliveira

RECIFE

2025

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,
através do programa de geração automática do SIB/UFPE

Lima Almeida, Elton César de.

Análise do impacto das vibrações mecânicas de máquinas rotativas no consumo de energia elétrica / Elton César de Lima Almeida. - Recife, 2025. 63 p. : il., tab.

Orientador(a): Carlos Augusto do Nascimento Oliveira
Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Universidade Federal de Pernambuco, Centro de Tecnologia e Geociências, Engenharia Mecânica - Bacharelado, 2025.

Inclui referências.

1. Vibrações mecânicas. 2. Máquinas rotativas. 3. Consumo de energia elétrica. 4. Desbalanceamento. 5. Desalinhamento. I. Nascimento Oliveira, Carlos Augusto do. (Orientação). II. Título.

620 CDD (22.ed.)

ELTON CÉSAR DE LIMA ALMEIDA

**ANÁLISE DO IMPACTO DAS VIBRAÇÕES MECÂNICAS DE
MÁQUINAS ROTATIVAS NO CONSUMO DE ENERGIA ELÉTRICA**

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi julgado adequado para obtenção do Título de “Engenheiro Mecânico” e aprovado em sua forma final pelo Curso de Graduação em Engenharia Mecânica.

RECIFE, 13 de Agosto de 2025.

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Eng. Carlos Augusto do
Nascimento Oliveira
Instituição UFPE

Prof. Dr. Eng. Tiago Leite Rolim
Instituição UFPE

Prof. Dr. Eng. José Carlos Albuquerque da
Silva
Instituição IFBA

Este trabalho é dedicado aos meus queridos pais. Edinilson, que tinha o sonho de também virar engenheiro, mas, devido a problemas de saúde do meu avô, não conseguiu ingressar na universidade por motivos financeiros, o sonho não foi possível de ser realizado. Porém, sempre que falava de máquinas, construções, projetos, etc, me inspirava a querer aprender mais e mais. Nossa conexão é coisa de Alma.

Já Cláudia, professora, sempre muito dedicada no que faz, me ensinou sempre a ter disciplina, batalhar pelos objetivos e sempre cumprir com as obrigações da vida. Além de todo cuidado que tem por mim, a fim de garantir que não me falte nada e sinta sua presença durante todos os dias de minha vida.

Papai, Mamãe, amo vocês demais!

Dedico este trabalho também a minha vó Sevi, a qual partiu para o plano celestial recentemente, não deixarei de pensar em você um só dia da minha vida. Te amo!!!

AGRADECIMENTOS

Inicio este trabalho agradecendo primeiro a Deus pelo dom da vida, por me agraciar com saúde e condições intelectuais de elaborar o mesmo. Sem sua presença e cuidado constante em minha vida não chegaria ao fim desse ciclo chamado graduação.

Agradeço ainda à minha família, em especial aos meus pais, Cláudia e Edinilson, que sempre fizeram de tudo por mim e muitas vezes abriram mão dos sonhos deles pelos meus. Ao meu tio Luiz Carlos por sempre ter me ajudado nos momentos importantes da vida, aos meus tios Heloiza e Jorge pelos conselhos e forças de sempre. Às minhas avós, Helena e Sevi (*in memoriam*), por ter cuidado de mim na infância para que meus pais pudessem me oferecer um bom lar, cuidado este que dura até os dias de hoje. Aos meus avôs, José Claudino e Luiz Minervino, que já não se encontram no plano terrestre, porém, não esqueci deles em um só momento durante essa jornada acadêmica.

À Universidade Federal de Pernambuco, em especial ao DEMEC, agradeço por todo o conhecimento que me foi passado a fim de permitir me transformar no profissional que sou hoje. Ao Professor Tiago Rolim que me auxiliou durante toda a elaboração deste trabalho e sempre se mostrou disponível para realizar os experimentos e sanar todas as dúvidas, meu sinceros agradecimentos. Que o bom Deus lhe conceda uma excelente aposentadoria. Ao Professor Carlos Augusto pelos conselhos profissionais e correções deste trabalho.

Aos meus amigos da faculdade, Elder, Heitor Falcão, Lucas, Mateus Cordeiro, Artur, Thiago, Yuri Meireles e Maiesk, que foram companhia de luta durante esses longos anos, obrigado pelas noites de estudos, trabalhos, projetos, palavras de força e ombro amigo.

Aos meus amigos da vida, Jéssica, Mateus, Fábio, Neto, Marcos Felipe, Paulo, Swellyngton, Gustavo, Yuri, Caio, Bruno, Heitor Felipe, que estiveram ao meu lado durante os momentos mais especiais e também difíceis da minha vida, obrigado por tudo e espero estar ao lado de vocês até os últimos dias das nossas vidas.

À Tramontina Delta, empresa em que trabalho, meus sinceros agradecimentos pela oportunidade profissional que tanto agrega em minha vida. A empresa se tornou uma grande escola para mim e com toda certeza vem me transformando num profissional melhor a cada dia.

Tudo é do Pai
Toda honra e toda glória
É Dele a vitória
Alcançada em minha vida

Tudo é do Pai
Se sou fraco e pecador
Bem mais forte é o meu Senhor
Que me cura por amor.

-Padre Marcelo Rossi.

RESUMO

Este trabalho tem como objetivo analisar o impacto financeiro que as vibrações mecânicas exercem sobre o consumo de energia elétrica em máquinas rotativas. A metodologia empregada baseou-se na utilização de uma bancada didática, onde foram realizadas medições em três condições distintas: estado inicial encontrado, com desbalanceamento, e com desbalanceamento associado ao desalinhamento. Em cada etapa, foram coletados dados de consumo de energia elétrica para avaliação comparativa. Os resultados demonstraram que a presença de vibrações mecânicas, oriundas de falhas como desbalanceamento e desalinhamento, eleva significativamente o consumo de energia e também que a medida que a velocidade é aumentada o consumo de energia elétrica também aumenta. A análise evidenciou aumentos percentuais nos custos, confirmando que a má condição mecânica de máquinas rotativas representa não apenas um risco operacional, mas também um impacto direto na eficiência energética e nos gastos com eletricidade. Conclui-se que o monitoramento e controle das vibrações são essenciais para a redução de desperdícios e a melhoria do desempenho energético em ambientes industriais.

Palavras-chave: vibrações mecânicas; máquinas rotativas; consumo de energia elétrica; eficiência energética; desbalanceamento, desalinhamento.

ABSTRACT

This work aims to analyze the financial impact that mechanical vibrations have on the electric energy consumption of rotating machinery. The methodology was based on the use of a didactic test bench, where measurements were carried out under three distinct conditions: the initial state, with unbalance, and with unbalance combined with misalignment. At each stage, electrical energy consumption data were collected for comparative analysis. The results showed that the presence of mechanical vibrations, resulting from faults such as unbalance and misalignment, significantly increases energy consumption. It was also observed that as rotational speed increases, energy consumption rises as well. The analysis revealed percentage increases in energy costs, confirming that poor mechanical condition of rotating machines represents not only an operational risk but also has a direct impact on energy efficiency and electricity expenses. It is concluded that vibration monitoring and control are essential to reduce waste and improve energy performance in industrial environments.

Keywords: mechanical vibrations; rotating machines; electric energy consumption; energy efficiency; unbalance; misalignment.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Pêndulo Simples.	16
Figura 2 – Exemplos de máquinas rotativas.	19
Figura 3 – O motor e suas partes.	20
Figura 4 – Exemplo de Espectro de Vibração.	21
Figura 5 – Exemplo de Sinal Vibratório no domínio do tempo e da frequência.	22
Figura 6 – Espectro de vibração de uma máquina desbalanceada.	23
Figura 7 – Tipos de desbalanceamento.	24
Figura 8 – Exemplo dos dois tipos de desalinhamento de eixos.	24
Figura 9 – Espectro de vibração de uma máquina desalinhada angularmente.	25
Figura 10 – Espectro de vibração de uma máquina desalinhada linearmente (Paralelo).	26
Figura 11 – Espectro de vibração de uma máquina com eixo empenado.	27
Figura 12 – Espectro de vibração de uma máquina com folgas.	28
Figura 13 – Espectro de vibração de uma máquina com folgas.	28
Figura 14 – Espectro de vibração de uma máquina com folgas.	29
Figura 15 – Espectro de vibração de uma máquina com roçamento.	30
Figura 16 – Níveis de Vibração.	31
Figura 17 – Exemplos de pontos de medição em um sistema.	31
Figura 18 – Modelo 3D da Bancada Didática.	33
Figura 19 – Elemento Girante	34
Figura 20 – Vista Frontal do Elemento Girante	35
Figura 21 – Detector III FAG.	35
Figura 22 – Imagem do Wattímetro.	36
Figura 23 – Organização das Medições.	37
Figura 24 – Quadro de medições 1ª configuração - Condições Iniciais	42
Figura 25 – Espectro de vibração do Motor LA Radial Vertical - Condições Iniciais	43
Figura 26 – Espectro de vibração do Rotor LA Radial Vertical - Condições Iniciais	44
Figura 27 – Potência Elétrica Aferida - Condições Iniciais	45
Figura 28 – Quadro de medições 1ª configuração - Desbalanceada e Alinhada	46
Figura 29 – Espectro de Vibração do Motor LA na Radial Vertical - Desbalanceada	46
Figura 30 – Espectro de Vibração do Rotor LA na Radial Vertical - Desbalanceada	47
Figura 31 – Potência Elétrica Aferida - Desbalanceada	47
Figura 32 – Quadro de medições 1ª configuração - Desbalanceada e Desalinhada	48
Figura 33 – Espectro de Vibração do Rotor LOA na Radial Vertical - Desbalanceada e Desalinhada	49
Figura 34 – Espectro de Vibração do Rotor LOA na Radial Horizontal - Desbalanceada e Desalinhada	49
Figura 35 – Potência Elétrica Aferida - Desbalanceada e Desalinhada (1500 RPM)	50

Figura 36 – Medições 2ª Configuração - Condições Iniciais	51
Figura 37 – Espectro de Vibração do Motor LA na Radial Horizontal - Condições Iniciais	51
Figura 38 – Potência Elétrica Aferida - Condições Iniciais (3000 RPM)	52
Figura 39 – Medições 2ª Configuração - Desbalanceada (3000 RPM)	53
Figura 40 – Espectro de Vibração do Motor LA na Radial Horizontal - Desbalanceada (3000 RPM)	53
Figura 41 – Potência Elétrica Aferida - Desbalanceada (3000 RPM)	54
Figura 42 – Medições Configuração Extra (1800 RPM) - Desbalanceada e Desalinhada	55
Figura 43 – Espectro de Vibração do Rotor LOA na Radial Vertical - Desbalanceada e Desalinhada (1800 RPM)	55
Figura 44 – Espectro de Vibração do Rotor LOA na Radial Horizontal - Desbalanceada e Desalinhada (1800 RPM)	56
Figura 45 – Potência Elétrica Aferida - Desbalanceada e Desalinhada (1800 RPM) .	57

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Distribuição ISO 10816	30
Tabela 2 – Componentes da bancada (CAVALCANTE, 2017)	34

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
1.1	OBJETIVOS	15
1.1.1	Objetivo Geral	15
1.1.2	Objetivos Específicos	15
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	16
2.1	INTRODUÇÃO À ANÁLISE DE VIBRAÇÃO	16
2.1.1	Definição de vibração mecânica	16
2.1.2	Importância da análise de vibração em máquinas rotativas . .	17
2.2	MÁQUINAS ROTATIVAS E SEU FUNCIONAMENTO	18
2.2.1	Tipos de máquinas rotativas	18
2.2.2	Componentes e elementos de um motor elétrico	20
2.3	MÉTODO DE ANÁLISE DE VIBRAÇÃO	21
2.3.1	Considerações Iniciais	21
2.3.2	Principais defeitos e seus diagnósticos	22
2.3.2.1	<i>Desbalanceamento</i>	23
2.3.2.2	<i>Desalinhamento</i>	24
2.3.2.3	<i>Empenamento de eixos</i>	26
2.3.2.4	<i>Folgas</i>	27
2.3.2.5	<i>Roçamento</i>	29
2.3.3	Norma ISO 10816	30
3	METODOLOGIA	33
3.1	EQUIPAMENTOS PARA ANÁLISE	33
3.1.1	Bancada didática	33
3.1.2	Sensor de Vibração	35
3.1.3	Alicate Wattímetro	36
3.2	EXPERIMENTOS	37
3.2.1	1ª Configuração - 1500 RPM	38
3.2.2	2ª Configuração - 3000 RPM	39
3.2.3	Configuração Extra - 1800 RPM	39
3.3	CÁLCULO DO CONSUMO DE ENERGIA	39
4	RESULTADOS	41
4.1	1ª CONFIGURAÇÃO - MOTOR COM 1500 RPM	41
4.1.1	1º Caso - Condições iniciais	41
4.1.2	2º Caso - Desbalanceada	45
4.1.3	3º Caso - Desbalanceada e Desalinhada	48
4.2	2ª CONFIGURAÇÃO - MOTOR COM 3000 RPM	50
4.2.1	1º Caso - Condições iniciais	50

4.2.2	2º Caso - Desbalanceada	52
4.3	CONFIGURAÇÃO EXTRA - MOTOR COM 1800 RPM	54
4.3.1	Caso único - Desbalanceada e Desalinhada	54
5	CONCLUSÃO	58
	REFERÊNCIAS	60

1 INTRODUÇÃO

Com o aumento do ambiente competitivo das indústrias nos últimos anos, a busca pela redução do custo operacional de qualquer planta é sempre pauta nas mais diversas reuniões corporativas. Dentre muitos fatores, o consumo de energia elétrica sempre se destaca dentro do orçamento industrial. Segundo estudo da Federação das Indústrias do Estado do Rio de Janeiro (FIRJAN) de 2017, os gastos do setor industrial com energia elétrica podem representar mais de 40% de seus custos de produção. Portanto, se apresenta como uma variável crítica que deve ser trabalhada sua diminuição ao máximo possível.

Dessa forma, em meio à competitividade do mercado, uma boa oportunidade de alavancar os resultados é reduzir os custos operacionais mirando o custo de energia elétrica sem que haja a perda de produtividade. Sem contar, ainda, que a redução da utilização de eletricidade tem uma grande importância na parte de sustentabilidade, já que cerca de 61% da matriz elétrica mundial ainda é composta por fontes que utilizam combustíveis fósseis. (EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE), 2023)

A metodologia utilizada neste trabalho parte da análise de eficiência energética de uma bancada didática para estudos de vibrações mecânicas. No trabalho verifica-se a quantidade de eletricidade consumida com o equipamento vibrando e compara-se com a condição ideal de utilização. Será feito também o monitoramento das vibrações mecânicas, que é uma das técnicas da manutenção preditiva. O tema foi escolhido pela escassez de estudos quantitativos integrando a redução de custos de eletricidade com a análise de vibração no ambiente acadêmico.

Segundo Kardec e Nascif (2020), a manutenção é dividida em vários tipos, alguns exemplos são: manutenção preventiva, manutenção corretiva planejada, manutenção corretiva não planejada, manutenção preditiva, manutenção detectiva, entre outras. Porém, todas essas classificações se resumem em apenas duas: manutenção corretiva e manutenção preventiva. Dentro da manutenção preventiva se encontra a manutenção preditiva que busca prever a ocorrência de alguma falha ou defeito em máquinas ou dispositivos analisados por meio de ensaios não destrutivos (END) ou controle estatístico. No caso de END, as técnicas mais utilizadas são ultrassonografia, análise de vibração, análise de óleo lubrificante e termografia (VIANA, 2022).

Dessa maneira, a análise de vibração mecânica é bastante utilizada como forma de prever a falha de máquinas rotativas industriais como tornos mecânicos, fresadoras, bombas hidráulicas, bombas centrífugas, motores elétricos, exaustores, entre outros, a fim de criar um planejamento para realizar as intervenções necessárias sem afetar a produção. Porém, nesse estudo será mostrada a possibilidade de economia de energia elétrica desses ativos, melhorando a sua eficiência. Conforme citado acima, durante esse trabalho será utilizada uma bancada didática de estudos de vibrações mecânicas para realização dos experimentos, um medidor de vibração e um wattímetro, a fim de medir o impacto financeiro no consumo

da eletricidade.

Serão utilizados três configurações de medição da vibração do sistema. O primeiro será com a bancada sob a velocidade de 1500 RPM, o segundo com 3000 RPM e uma configuração extra com 1800 RPM. Em cada configuração serão feitas medições com a bancada nas condições iniciais, desbalanceada e unindo os efeitos da bancada desbalanceada e desalinhada. No caso da bancada trabalhando em 3000 RPM não foi possível aferir os dados no caso da união entre o desbalanceamento e desalinhamento. À medida que a velocidade de rotação foi incrementada, a bancada apresentou uma instabilidade muito significativa; logo, por motivos de segurança, não foi feita medição nesse caso. Sendo assim, a velocidade de 1800 RPM foi o valor que apresentou um comportamento seguro para realizar as medições.

Por fim, após a execução desta proposta, espera-se que uma máquina com vibrações excessivas consuma mais energia do que um equipamento com as vibrações dentro dos limites de tolerância da norma ISO 10816. Em seguida, será mostrado o impacto financeiro que as vibrações mecânicas causarão nesse equipamento durante uma operação de 18 meses.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo Geral

Este trabalho tem o objetivo geral de quantificar o impacto da vibração no consumo de energia elétrica de equipamentos industriais rotativos, utilizando uma bancada didática, pertencente ao laboratório de mecânica do galpão do DEMEC-UFPE, através de dados obtidos por um alicate wattímetro e um detector de vibração. A severidade da vibração será definida com os limites estabelecidos pela norma 10816.

Para atingir o objetivo geral, foram traçados os seguintes objetivos específicos:

1.1.2 Objetivos Específicos

- Coletar os dados de velocidade e aceleração (RMS) das vibrações mecânicas, utilizando o detector de vibração;
- Analisar os espectros de vibração de cada medição, com auxílio do **Trendline**;
- Aferir a potência elétrica demandada pela bancada em todas as configurações desse trabalho;
- Demonstrar cálculo do custo com o consumo de energia elétrica;
- Confrontar os dados de cada caso e calcular o impacto financeiro no consumo de energia elétrica.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 INTRODUÇÃO À ANÁLISE DE VIBRAÇÃO

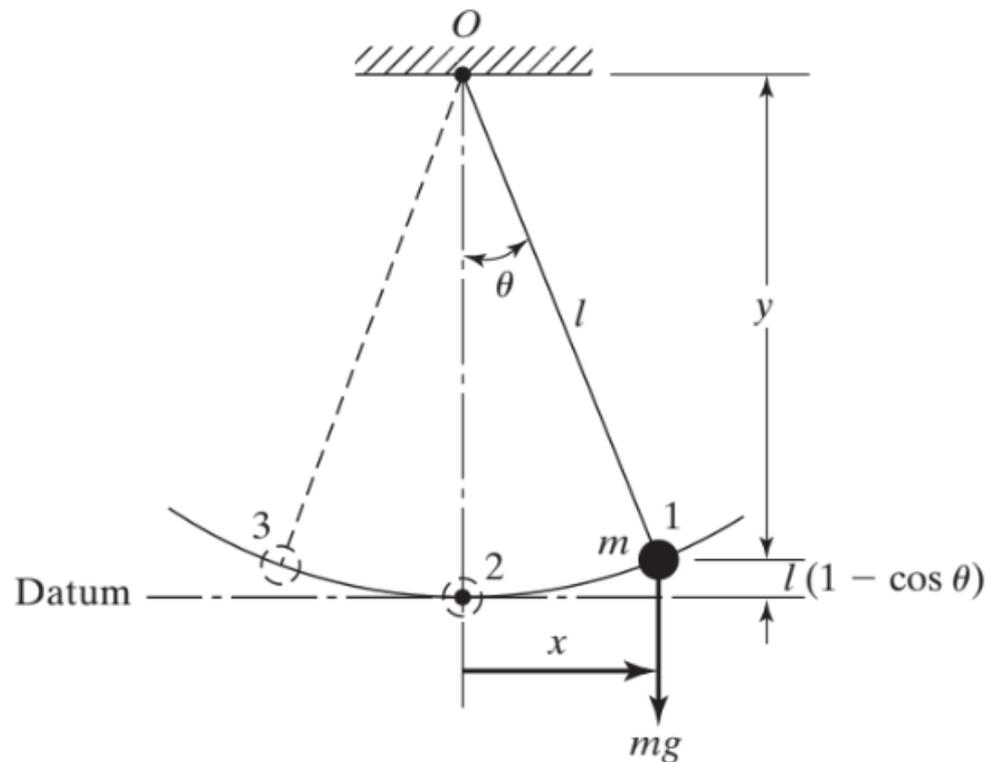
2.1.1 Definição de vibração mecânica

Vibração pode ser definida como a repetição de um movimento após um intervalo de tempo determinado, assim como em um pêndulo que oscila em relação a uma posição de referência ou numa membrana de um tambor musical, podendo também ser chamada de oscilação (RAO, 2018).

De outro modo, o fenômeno das vibrações, também conhecido como oscilações, pode ser considerado também como um subconjunto da dinâmica, no qual um sistema é submetido a forças restauradoras que o fazem oscilar em torno de uma posição de equilíbrio. As forças restauradoras podem ser atribuídas tanto à elasticidade quanto à gravidade (MEIROVITCH, 2001).

Assim, a vibração mecânica pode ser entendida como o movimento periódico de um componente de máquina ou estrutura. Pode-se ver na figura 1 um pêndulo simples como exemplo de um sistema mecânico oscilatório.

Figura 1 – Pêndulo Simples.



Fonte: (RAO, 2018)

Em um sistema oscilatório (vibratório) existem meios de armazenamento de energia potencial e cinética. São eles: molas, elasticidade do próprio material, como massa, inércia, entre outros. Também encontram-se nesses sistemas meios de dissipação de energia, como os amortecedores (RAO, 2018).

Logo, observa-se que o sistema oscilatório ganha energia potencial ao ser excitado. Colocar a esfera deslocada de um ângulo θ , em relação à posição de repouso, é uma forma dessa excitação. À medida que a esfera é solta e vai percorrendo uma trajetória circular, a energia potencial (altura) vai sendo transformada em energia cinética (velocidade). Com o passar do tempo, o pêndulo vai oscilando com amplitudes cada vez menores por conta da resistência do ar, que funciona como um amortecedor, dissipando energia (RAO, 2018).

A vibração pode ser classificada como vibração livre e forçada. A vibração livre ocorre quando o sistema é excitado inicialmente e deixado vibrar por si só, ou seja, com ausência de forças externas. Já a vibração forçada é caracterizada por um sistema submetido a uma força externa e geralmente essa força é de natureza repetitiva. Se a frequência dessa força coincidir com a frequência natural do sistema, uma condição extremamente perigosa surge, provocando oscilações de grandes magnitudes que podem causar falhas na máquina ou estrutura estudada. Essa condição é chamada de *Ressonância* (RAO, 2018).

Nota-se, ainda, que se a oscilação não possuir dissipação de energia devido a resistências do sistema, como atrito e arrasto, ela é conhecida como vibração não amortecida. Nesse sentido, caso possua algum tipo de dissipação de energia, é chamada de vibração amortecida (KELLY, 2011).

A vibração pode levar ao surgimento de diversos problemas que podem ser identificados por diferentes ruídos e comportamentos que se propagam em um determinado ativo industrial. No entanto, a vibração nem sempre é algo negativo em um componente. Há aparelhos que necessitam de vibração para cumprir com suas funções, ou seja, sem vibração não é possível a realização de trabalho para o qual o dispositivo foi projetado. São exemplos: a esteira oscilante para transportar grãos, martelotes, compactadores de solo, entre outros. Portanto, é necessário aprender bem os conceitos envolvidos neste tema.

2.1.2 Importância da análise de vibração em máquinas rotativas

A manutenção preditiva é um dos tipos de manutenção que existem no ambiente industrial em que pode-se gerar resultados consideráveis em termos de economia, pois evita interrupções indesejadas no maquinário, que impactam na produção da planta. Com a utilização dessa técnica é possível programar paradas estratégicas na produção a fim de realizar reparos e trocas de componentes antes de ocorrer a falha. (VIANA, 2022).

A manutenção preditiva consiste no monitoramento dos parâmetros de funcionamento de uma máquina. De modo que seja possível encontrar o momento mais oportuno para interromper o funcionamento da máquina e realizar algum reparo. Quando se fala

de máquinas rotativas, uma das melhores técnicas de manutenção preditiva é a análise de vibração. Essa escolha é devido a quantidade de informações que podem ser extraídas da sua "assinatura de vibração". Essa assinatura nada mais é que a frequência resultante captada pelo sinal vibratório do equipamento em funcionamento e sua análise virá a contribuir na tomada de decisão do momento de programação de paradas (NETO, 2006).

A análise de vibração se baseia na ideia de que os esforços dinâmicos das máquinas causam uma excitação em toda sua estrutura. Essa estrutura vibra na mesma frequência dos esforços que geraram a vibração. Desse modo, utilizando sensores que captam e registram o sinal vibratório da máquina, é possível adquirir a assinatura de vibração, conhecida por espectro de vibração. Logo, pode-se comparar essa assinatura com um conjunto de espectros de diagnósticos já conhecidos (MIRSHAWKA, 1991).

Esses diagnósticos elencam uma grande quantidade de falhas em sistemas mecânicos rotativos, devido ao estado de seus componentes. Dessa maneira, a fim de entender os impactos causados pela vibração mecânica em conjuntos rotativos, é interessante verificar as principais técnicas de análise e o conjunto de espectros já conhecidos.

2.2 MÁQUINAS ROTATIVAS E SEU FUNCIONAMENTO

2.2.1 Tipos de máquinas rotativas

Todas as máquinas rotativas possuem no mínimo três componentes principais: rotor, suportes e estrutura. O rotor é a parte principal da máquina, considerado o coração do conjunto. Sabendo disso, o rotor é conectado à estrutura do equipamento por meio de suportes, que na grande maioria das vezes são rolamentos. Os rolamentos podem ser de rolos ou de esferas, a depender da solicitação mecânica. A estrutura, geralmente, é composta de um estator e uma fundação. O estator é a parte da máquina que compõe a estrutura e não rotaciona, já a fundação funciona fixando a máquina no local de trabalho (FRISWELL *et al.*, 2010).

Essas máquinas são dispositivos que convertem energia em movimento rotativo. Máquinas rotativas são amplamente utilizadas em diferentes setores industriais como manufatura, transporte e geração de energia. Um exemplo comum de máquina rotativa, usada no cotidiano, é o motor a combustão interna, encontrado nos veículos automotivos. Esse tipo de motor utiliza a queima de combustíveis, como gasolina ou diesel, para gerar um movimento rotativo que será transmitido até as rodas do veículo e moverá o mesmo.

Outro exemplo é o motor elétrico, que converte energia elétrica em movimento rotativo por meio da interação de campos eletromagnéticos. As máquinas rotativas inseridas neste contexto são as bombas centrífugas, hidráulicas, de vácuo, além de geradores elétricos, máquinas operatrizes como o torno mecânico, fresadoras, retificadora, turbinas a gás e a vapor, etc. Essas máquinas rotativas desempenham um papel crucial no funcionamento de muitas plantas industriais, impactando diretamente na fabricação de produtos

acabados, insumos ou peças de reposição para ativos industriais (FRISWELL *et al.*, 2010). A figura 2 (a, b e c) mostra três tipos de máquinas rotativas.

Figura 2 – Exemplos de máquinas rotativas.

(a) Bomba centrífuga.



Fonte: (REVEL BOMBAS, 2023)

(b) Motor Elétrico.



Fonte: (PREDIMEC CONSULTORIA EM MANUTENÇÃO, 2023)

(c) Torno Mecânico.



Fonte: (ZUCOTEC ELETRÔNICA INDUSTRIAL, 2023)

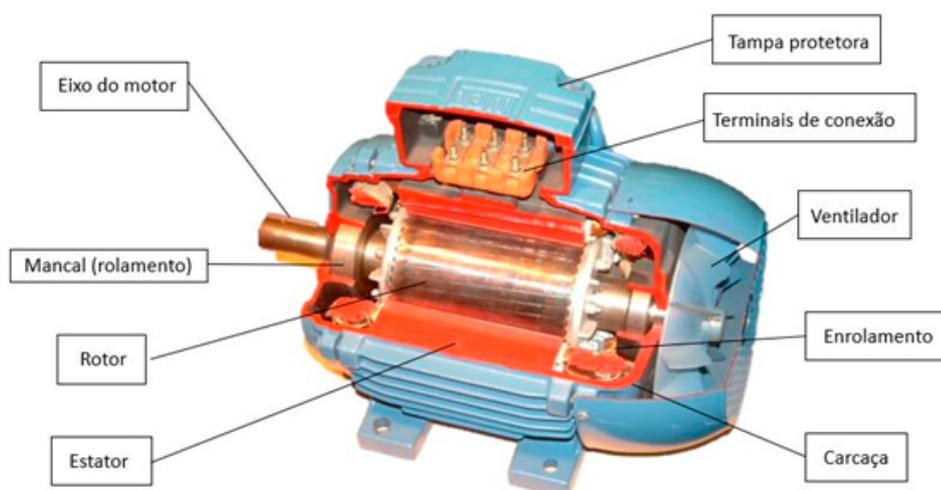
2.2.2 Componentes e elementos de um motor elétrico

Os componentes presentes em motores elétricos já são bem conhecidos, e não fogem dos três componentes citados acima, sendo assim, serão listados e comentados a seguir as principais peças de um motor elétrico:

- Estator: Parte estática presente em motores elétricos, fixada ao redor do rotor, formado de material ferromagnético, que irá interagir eletromagneticamente com o rotor a fim de produzir o movimento da máquina;
- Rotor: Parte girante, presente em motores elétricos e também em bombas hidráulicas e centrífugas, porém desempenham papéis diferentes. Nos motores é formado de material ferromagnético e interage com o estator para dar movimento ao conjunto. Nas bombas tem o papel de girar e com isso criar um diferencial de pressão que irá induzir o movimento do fluido;
- Eixo: Tem o papel de transmitir a potência mecânica que o motor produziu e também suportar a estrutura do rotor dos motores elétricos;
- Mancais: São elementos que servem de alojamento e suporte para os rolamentos dos elementos girantes das máquinas.
- Rolamentos: São componentes que permitem o giro suave, com baixo atrito, de eixos, árvores e outras peças girantes.

Na figura 3 é possível ver a localização das peças citadas em um motor elétrico.

Figura 3 – O motor e suas partes.



Fonte: (GUIA DE MOTORES, 2025)

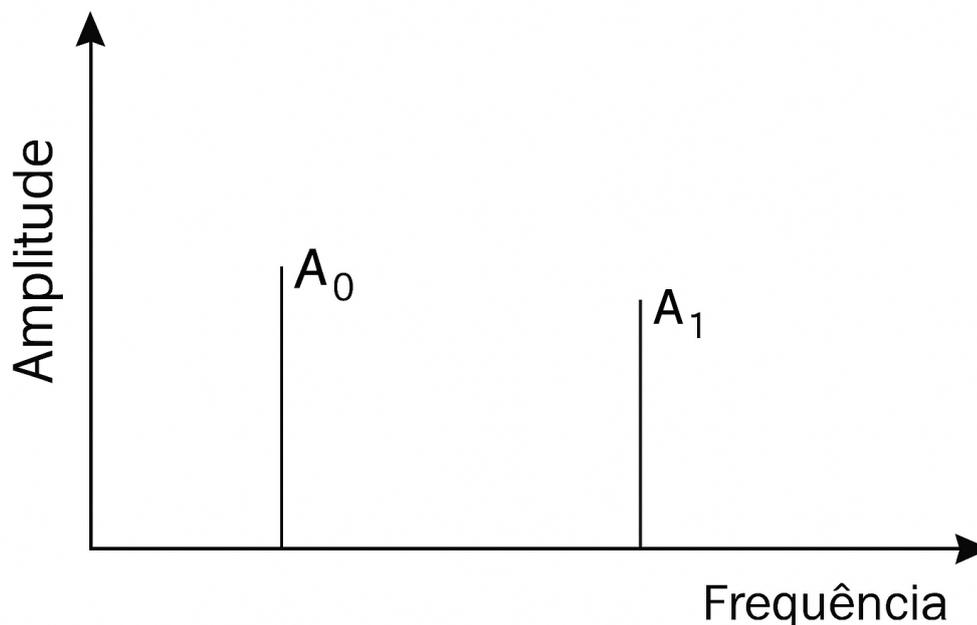
2.3 MÉTODO DE ANÁLISE DE VIBRAÇÃO

2.3.1 Considerações Iniciais

Ao verificar alguma alteração na vibração de uma máquina que está sendo monitorada por meio de um sensor, é sinalizada a possibilidade de ocorrência de mudança de comportamento mecânico. Desse modo, percebe-se que o equipamento está operando fora das especificações do fabricante. Resta, ao analista, verificar e diagnosticar a causa da vibração que está ocorrendo com o ativo (NETO, 2006).

Sendo assim, a análise de vibração está toda baseada no conceito de que a máquina, ao sofrer solicitações dinâmicas, fornece sinais vibratórios com frequência similar aos esforços que geraram essas vibrações. Logo, é possível utilizar receptores que irão captar esse sinal e compará-lo com o sinal definido como padrão para o funcionamento da máquina. Esse sinal pode ser representado de inúmeras maneiras. Porém, o mais comum é o chamado espectro de vibrações no domínio da frequência. A figura 4 mostra um espectro genérico de vibração. Para interpretar a representação espectral é necessário conhecer as amplitudes A_0 a A_1 e também as frequências correspondentes a cada pico:

Figura 4 – Exemplo de Espectro de Vibração.

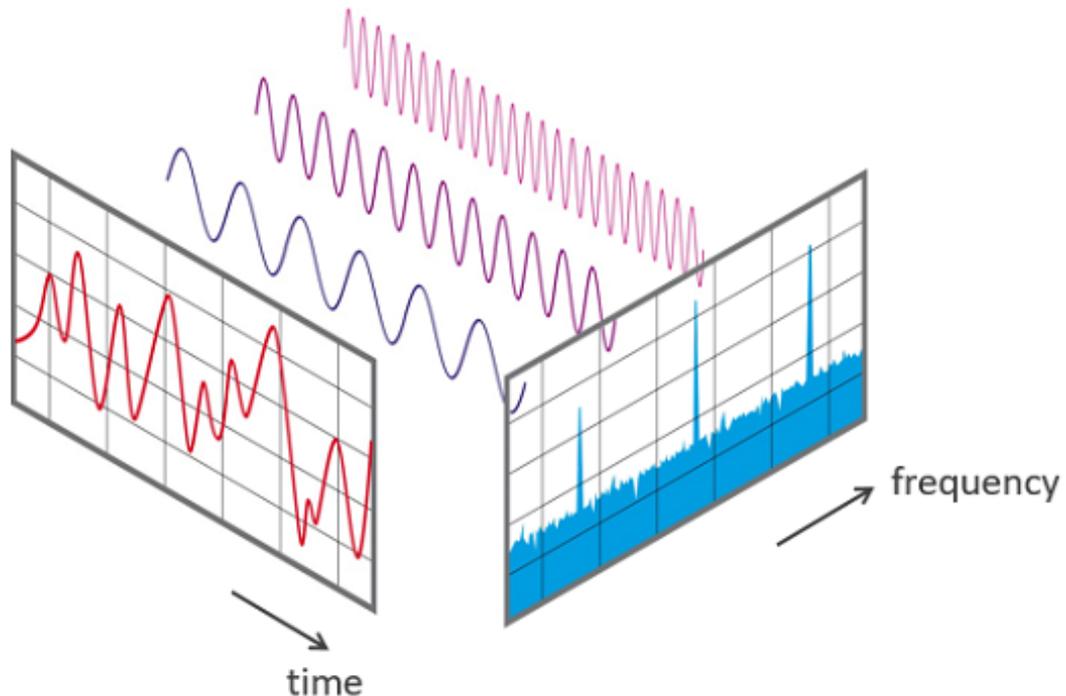


Fonte: Adaptado de (GONÇALVES, A. C. ALBUQUERQUE. M. C. F., 2015)

O espectro de vibração é formado a partir da decomposição do sinal vibratório no domínio do tempo em componentes espectrais individuais, fornecendo informações sobre a frequência do sinal. Esse método é realizado através do algoritmo da Transformada

Rápida de Fourier. A figura 5 mostra de maneira gráfica um sinal no domínio do tempo e da frequência:

Figura 5 – Exemplo de Sinal Vibratório no domínio do tempo e da frequência.



Fonte: (NTI AUDIO, 2025)

2.3.2 Principais defeitos e seus diagnósticos

As máquinas elétricas rotativas podem apresentar diversos problemas que resultam na geração de vibração mecânica excessiva. Dentre eles, enquadram-se problemas elétricos, mecânicos e hidráulicos. Porém, dentre os tipos citados, o mais comum, que representa a maioria dos problemas encontrados no cotidiano industrial, é a questão mecânica (JESUS SILVA, 2013). Sendo assim, dando ênfase à condição mecânica do ativo, os tópicos desse trabalho abordarão as seguintes falhas mecânicas:

- Desbalanceamento;
- Desalinhamento;
- Empenamento de eixos;
- Folgas
- Roçamento;

Para a análise dos espectros, é comum citar a notação 1X, 2X, 3X, etc. Esses valores representam a quantidade de vezes da frequência da rotação do eixo, isto é, uma vibração

na frequência 1X significa uma vibração na frequência de uma vez a rotação da máquina, ou seja na frequência de rotação do eixo. Uma vibração na componente 2X significa uma vibração na frequência de duas vezes a rotação do eixo. Sendo assim, nesta seção será utilizada esta notação nas explicações de cada defeito.

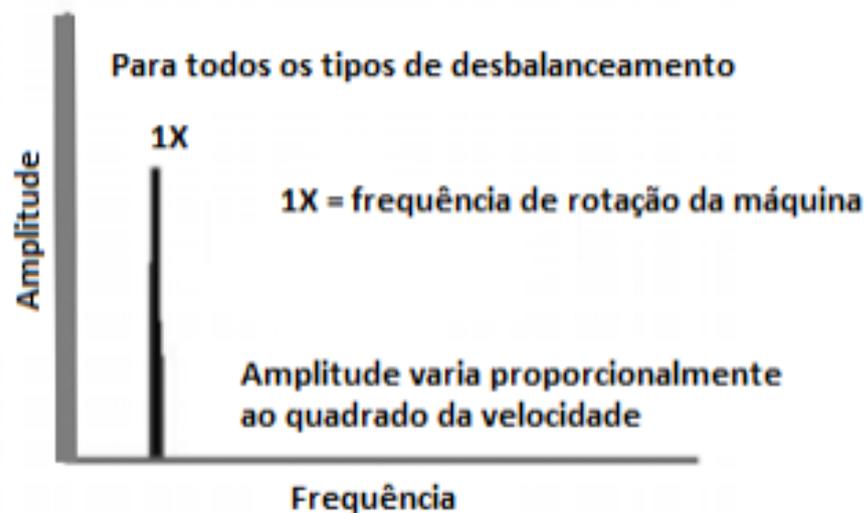
2.3.2.1 Desbalanceamento

Essa falha acontece quando a massa de um elemento girante está distribuída de maneira não uniforme em relação a um eixo de inércia (SPAMER, 2009). Pode-se dizer também que essa falha ocorre quando o centro de massa não coincide com o centro de rotação de um rotor, podendo ser por desgaste, erro de montagem ou fabricação, perdas de componentes, etc. Os principais sintomas são (JUNIOR, 2018):

- Vibrações altas na direção radial, com destaque na componente 1X;
- A medida que a velocidade de rotação aumenta, a amplitude da componente 1X também aumenta;

Sendo assim, todo tipo de desbalanceamento terá sua assinatura de vibração com um pico bem elevado na componente 1X e sua amplitude irá variar de acordo com o quadrado da velocidade de rotação da máquina (JESUS SILVA, 2013).

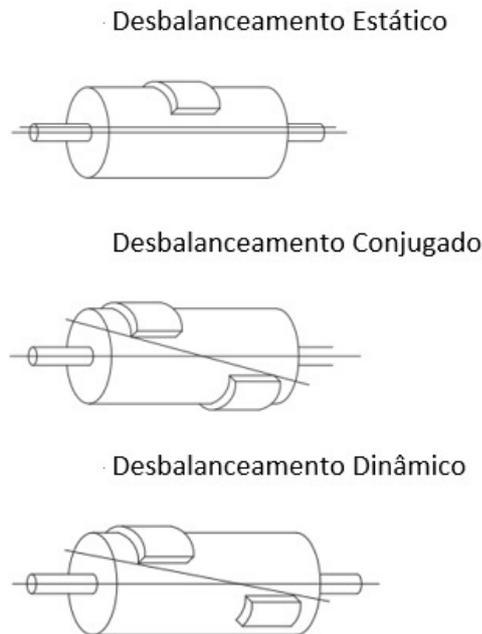
Figura 6 – Espectro de vibração de uma máquina desbalanceada.



Fonte: (JESUS SILVA, 2013)

O desbalanceamento pode ser classificado em três tipos: estático, dinâmico e conjugado. Pode-se ver na figura 7 exemplos de cada classificação.

Figura 7 – Tipos de desbalanceamento.

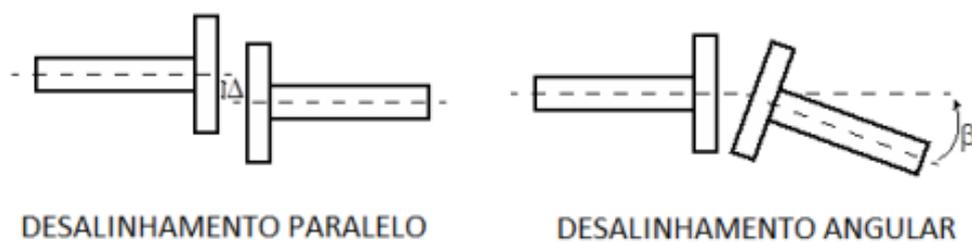


Fonte: (SIMETRIZA BALANCEAMENTO INDUSTRIAL, 2025)

2.3.2.2 Desalinhamento

Esse tipo de falha também se apresenta de maneira comum nos equipamentos rotativos que estão na indústria. Ocorrem em eixos acoplados, resultando em dois tipos gerais de desalinhamentos: desalinhamento angular e desalinhamento paralelo. O angular consiste na linha de centro dos eixos acoplados formando um ângulo entre si. Já o paralelo é quando as linhas de centro têm um deslocamento lateral entre si (JESUS SILVA, 2013). A figura 8 mostra um exemplo dos dois tipos de desalinhamento.

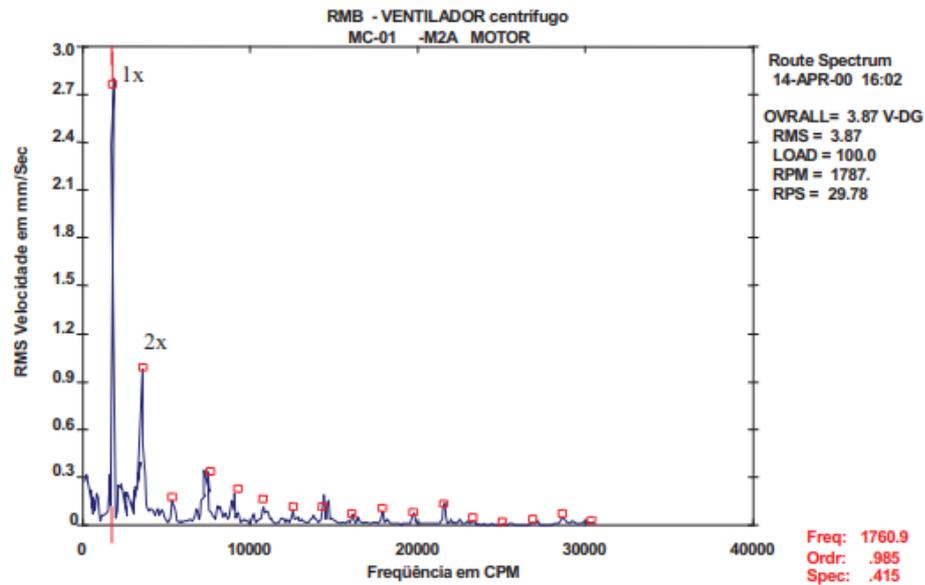
Figura 8 – Exemplo dos dois tipos de desalinhamento de eixos.



Fonte: (JESUS SILVA, 2013)

O desalinhamento angular se caracteriza por vibrações elevadas na direção axial nas frequências 1X e 2X. A figura 9 (SPAMER, 2009) demonstra um exemplo deste comportamento.

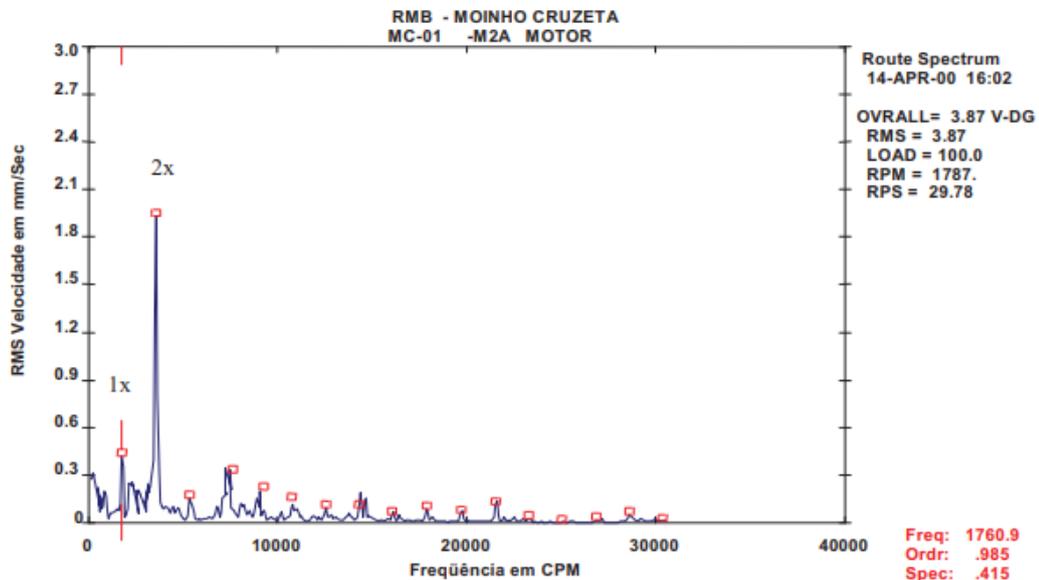
Figura 9 – Espectro de vibração de uma máquina desalinhada angularmente.



Fonte: (SPAMER, 2009)

O desalinhamento paralelo consiste numa dominância de vibração radial na frequência 2X, também podendo apresentar na direção axial alta vibração na frequência de rotação do equipamento. Observa-se o seu espectro na figura 10 (SPAMER, 2009).

Figura 10 – Espectro de vibração de uma máquina desalinhada linearmente (Paralelo).



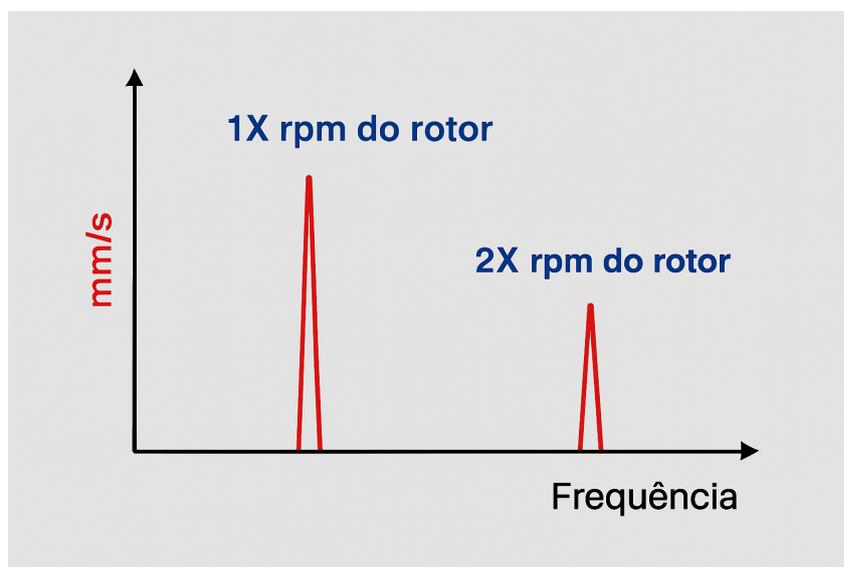
Fonte: (SPAMER, 2009)

2.3.2.3 Empenamento de eixos

O empenamento de eixos é um defeito comumente confundido entre desalinhamento e desbalanceamento. Quando é realizado um balanceamento, como forma de reparo para o defeito, pode ser observada uma redução da vibração, mas não será eliminada. O diagnóstico é feito observando vibrações elevadas nas frequências de 1X e 2X.

Na frequência de 1X ocorre quando a curvatura do empeno está mais próxima do meio do eixo, já com 2X ocorre mais próximo dos mancais. É possível ainda que haja uma combinação entre esses dois módulos (ROCHA, 2014). Na figura 11 é possível observar um espectro de vibração para esse caso.

Figura 11 – Espectro de vibração de uma máquina com eixo empenado.



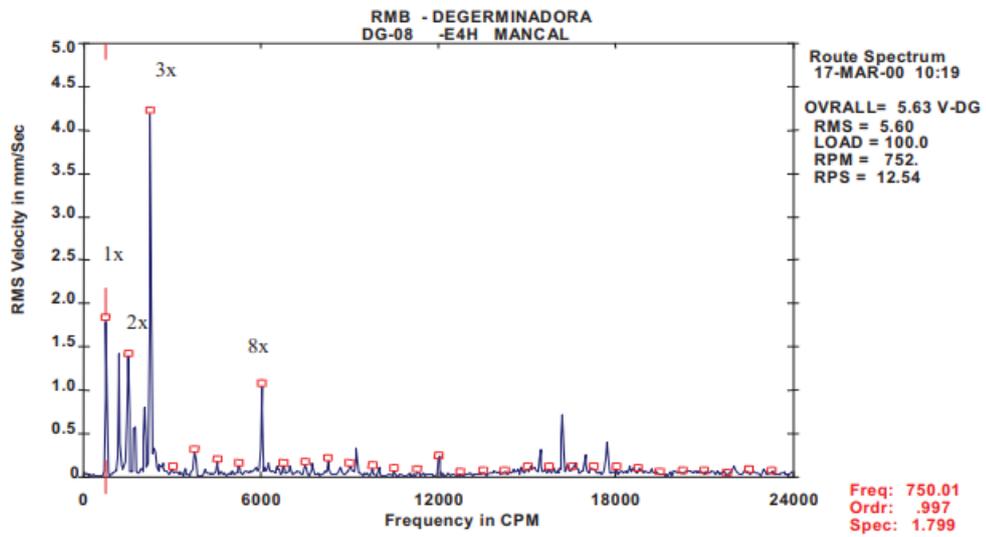
Fonte: Adaptado de (JUNIOR, 2018)

2.3.2.4 Folgas

As folgas ocorrem geralmente por desgaste. Porém, podem aparecer devido a erros na montagem ou fabricação, problemas na fundação e até trincas ou rupturas. Geralmente, as vibrações aparecem na direção vertical e na direção axial não são elevadas (JUNIOR, 2018).

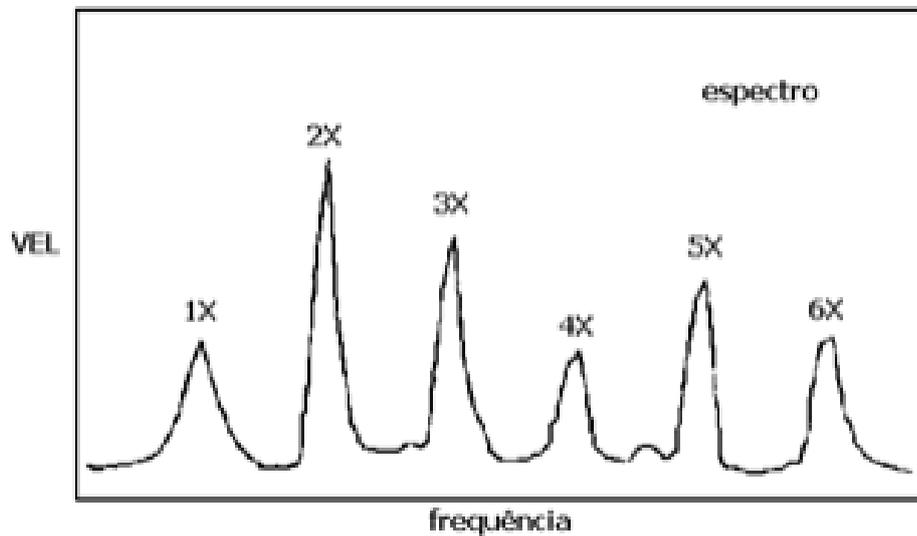
Desse modo, são geradas vibrações que conseguem chegar até a frequência de 10X ou mais (JESUS SILVA, 2013). As figuras 12, 13 e 14 mostram exemplos de espectro de máquinas rotativas que apresentam folgas:

Figura 12 – Espectro de vibração de uma máquina com folgas.



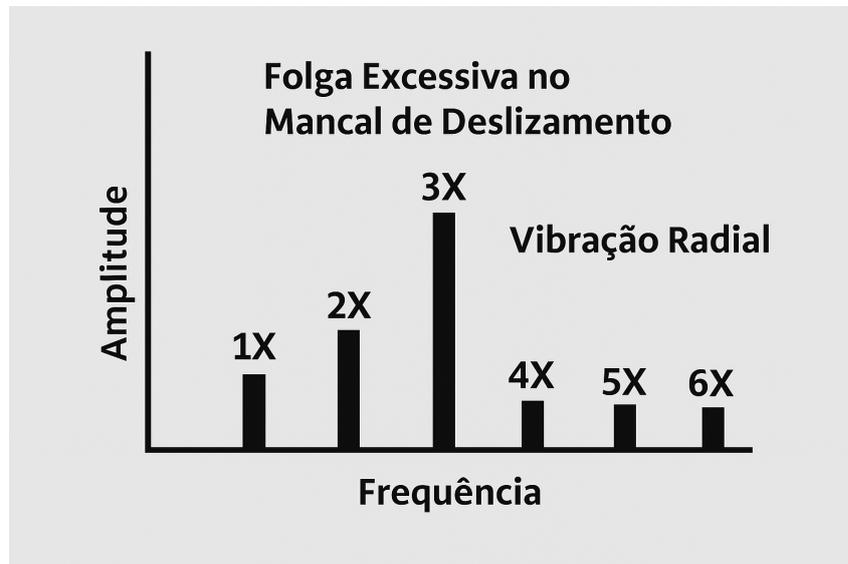
Fonte: (SPAMER, 2009)

Figura 13 – Espectro de vibração de uma máquina com folgas.



Fonte: (JUNIOR, 2018)

Figura 14 – Espectro de vibração de uma máquina com folgas.



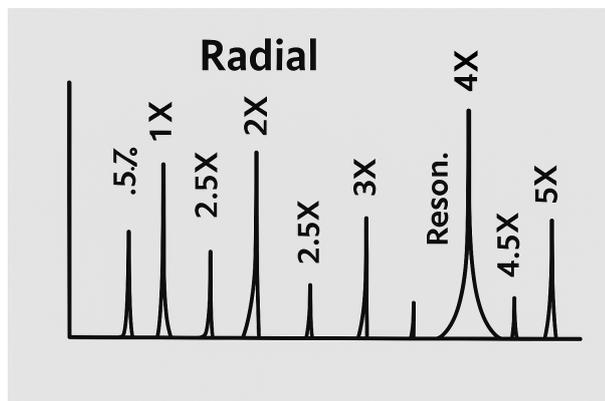
Fonte: Adaptada de (JESUS SILVA, 2013)

2.3.2.5 *Roçamento*

O roçamento consiste em partes girantes entrando em contato com partes fixas sem a proteção lubrificante dos óleos. Apresentam vibrações nas frequências 1X e 2X (ROCHA, 2014). Se o roçamento for contínuo, podem aparecer vibrações numa larga faixa de frequências. Se for parcial, aparecerão picos correspondentes às frequências naturais do sistema ($1/2$, $1/3$, $1/4$, ..., $1/n$)X (SPAMER, 2009).

Podem ainda aparecer vibrações em frequências parecidas a folgas (de três a dez vezes a frequência do eixo). Quando o roçamento é intenso, ocorre também vibração numa faixa larga de frequência relativamente baixa (JUNIOR, 2018). Sendo assim, observa-se um exemplo de assinatura de vibração de uma máquina com roçamento, na figura 15:

Figura 15 – Espectro de vibração de uma máquina com roçamento.



Fonte: Adaptada de (JUNIOR, 2018)

2.3.3 Norma ISO 10816

A norma ISO 10816 estabelece os critérios de avaliação e as recomendações para uma medição efetiva da condição de vibração de uma máquina rotativa, a partir de pontos de medição em partes não rotativas (SILVA, L. S. da, 2020). A norma determina ainda que a principal grandeza para análise de vibração no domínio do tempo é a velocidade RMS, que significa Raiz Quadrada Média ou valor eficaz e representa a magnitude de um conjunto de dados, que no caso desse trabalho são dados de vibração (WELFFGRANSCER, 2023). A norma ISO 10816 estrutura-se em algumas seções distintas, cada qual especificamente designada para a avaliação de diferentes categorias de máquinas. Na tabela 1 abaixo pode ser vista a lista com as partes desta norma (WELFFGRANSCER, 2023):

Tabela 1 – Distribuição ISO 10816

Parte 1	Diretrizes gerais
Parte 2	Turbinas de vapor e geradores
Parte 3	Máquinas críticas
Parte 4	Turbinas a gás
Parte 5	Turbinas hidráulicas
Parte 6	Máquinas de pistões alternativos
Parte 7	Bombas
Parte 8	Compressores
Parte 9	Turbinas eólicas

Fonte: Autor

A análise de vibração, segundo a ISO 10816, pode ser usada com vários objetivos, como: monitoramento de condição rotineiro, diagnósticos de problemas e também testes de aceitação. Desse modo, a norma foi projetada para fornecer os parâmetros de comparação

da medição (deslocamento, velocidade e aceleração) a fim de saber se a condição de funcionamento está dentro da tolerância; segue na figura 16 o quadro fornecido pela norma para definir alarmes, a partir da vibração do equipamento:

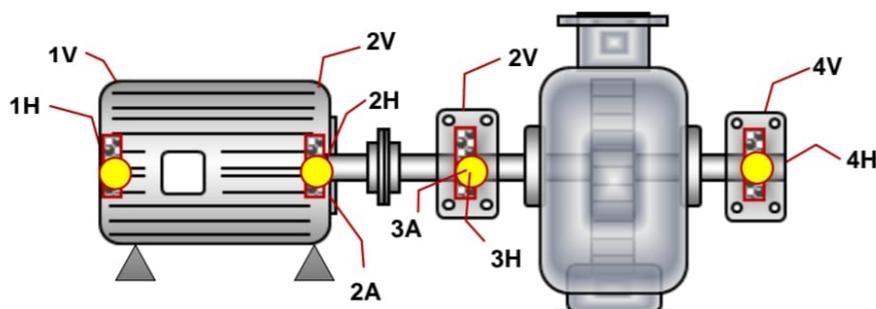
Figura 16 – Níveis de Vibração.

Classificação dos Níveis de Vibrações :				
- Velocidade (mm/s rms) / Deslocamento (μ m rms)				
ZONAS	GRUPO 1		GRUPO 2	
	Máquinas Grandes - 300kW a 50MW		Máquinas Médias - 15kW a 300kW	
	Altura do eixo - H \geq 315mm		Altura do eixo - 160mm \leq H < 315mm	
	BASE RÍGIDA	BASE ELÁSTICA	BASE RÍGIDA	BASE ELÁSTICA
A	BOM			
A / B	2,3 / 29	3,5 / 45	1,4 / 22	2,3 / 37
B	ACEITÁVEL			
B / C	4,5 / 57	7,1 / 90	2,8 / 45	4,5 / 71
C	INSATISFATÓRIO			
C / D	7,1 / 90	11,0 / 140	4,5 / 71	7,1 / 113
D	SEVERO SUFICIENTE			

Fonte: (OLIVEIRA, 2020)

Outro aspecto abordado pela norma diz respeito aos locais de coleta de dados na máquina, ou seja, aos pontos de medição que devem ser adotados. A ISO 10816 sugere que seja criada uma rota com pontos bem definidos o mais plano possível, e que os pontos não mudem em medições futuras. Desse modo, será possível adquirir dados confiáveis. A figura 17 mostra, em caráter exemplificativo, pontos de medição para um sistema aproximado ao da bancada utilizada nesse trabalho:

Figura 17 – Exemplos de pontos de medição em um sistema.



Fonte: (OLIVEIRA, 2020)

- Mancal do Motor - Lado oposto ao acoplamento (LOA)= 1H, 1V;
- Mancal do Motor - Lado do acoplamento (LA)= 2H, 2V, 2A;
- Mancal - Lado do acoplamento (LA)= 3H, 3V, 3A;
- Mancal - Lado oposto ao acoplamento (LOA)= 4H, 4V;

Onde "H" seriam medições na direção horizontal, "V" na vertical e "A" na axial. Exemplo: medição "3V" seria uma medição no mancal do lado do acoplamento (LA) na direção vertical.

3 METODOLOGIA

A metodologia deste trabalho é do tipo pesquisa exploratória, com finalidade de atender os objetivos supracitados. A natureza é quantitativa e qualitativa, já que foca em dados coletados com os equipamentos infracitados e em observações empíricas realizadas no laboratório.

Essa pesquisa possui aspectos bibliográficos e experimentais, uma vez que mescla uma revisão literária para nivelamento de conhecimento do leitor e também possui a realização de experimentos a fim de investigar o impacto financeiro que uma máquina em vibração excessiva (fora da tolerância da norma 10816) gera.

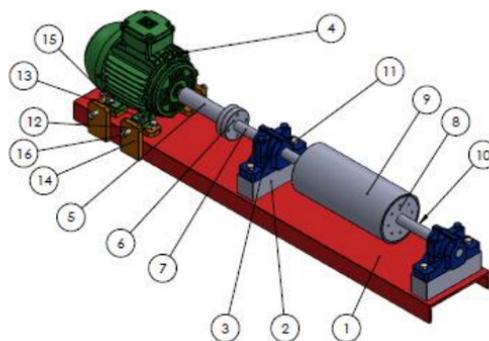
3.1 EQUIPAMENTOS PARA ANÁLISE

3.1.1 Bancada didática

A bancada didática para estudo de vibrações mecânicas do galpão do Departamento de Engenharia Mecânica da UFPE foi pensada e construída pelo Professor e Engenheiro José Carlos, durante a elaboração do seu trabalho de conclusão de curso (SILVA, J. C. A. da, 2016), e será utilizada como a ferramenta principal deste trabalho. Foi também utilizada durante o curso de Mestrado do Professor e Engenheiro Laertty Moraes (CAVALCANTE, 2017).

O equipamento possui um motor elétrico de indução trifásico com 0,25 kW da WEG, um inversor de frequência CFW-500 também da WEG, um acoplamento flexível com garras FC 250 da GT Redutores, dois mancais de rolamento com buchas cônicas SNA 506 da Burguer, eixos, elemento girante, etc. Pode-se ver na figura 18 o modelo 3D do aparato.

Figura 18 – Modelo 3D da Bancada Didática.



Fonte: (CAVALCANTE, 2017)

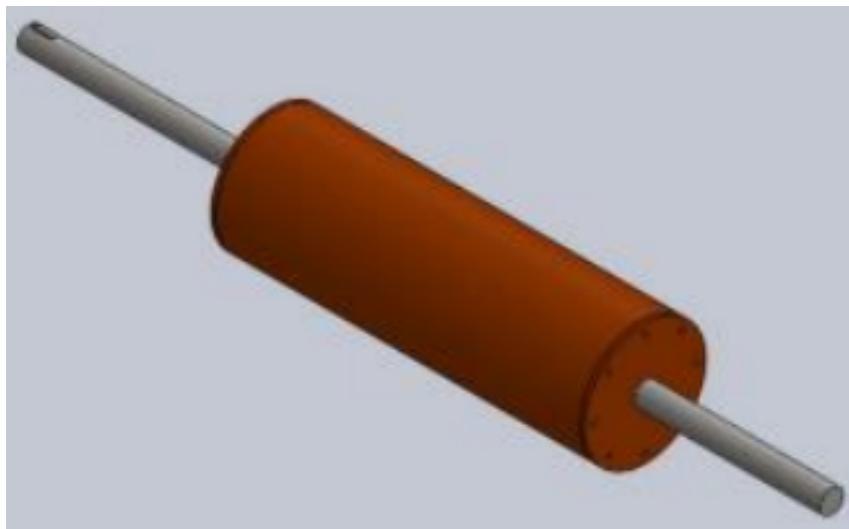
Tabela 2 – Componentes da bancada (CAVALCANTE, 2017)

1	Estrutura base
2	Base do mancal
3	Mancal
4	Motor
5	Eixo 1
6	Acoplamento
7	Eixo 2
8	Furo com rosca
9	Elemento Girante
10	Eixo 3
11	Parafuso M12 x 1,0 x 90
12	Mecanismo de elevação
13	Parafuso M8 x 1,0 x 50
14	Mecanismo de movimento do motor
15	Parafuso M10 x 1,0 x 30
16	Parafuso M10 x 1,0 x 50

Fonte: Autor

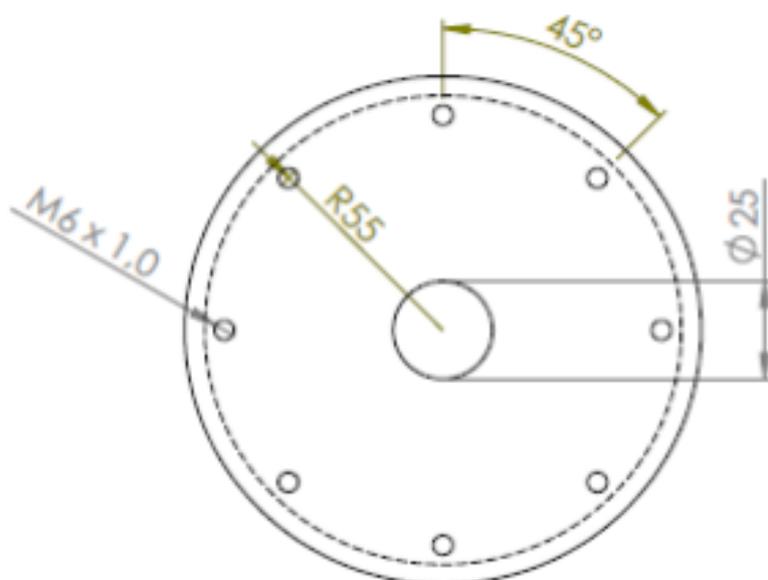
O sistema possui um elemento girante (item 9) que permite desbalancear o dispositivo de maneira proposital. Em cada extremidade há um padrão circular de roscas (conforme a figura 20) que permite a adição de pequenas massas deslocadas do centro de rotação da peça. Isto ocasiona um desbalanceamento, uma vez que o centro de massa estará deslocado do centro de rotação do elemento girante. Possibilita também o desalinhamento do equipamento por meio de um mecanismo de movimentação do motor (item 14). A figura 19 mostra o elemento girante.

Figura 19 – Elemento Girante



Fonte: (CAVALCANTE, 2017)

Figura 20 – Vista Frontal do Elemento Girante



Fonte: (CAVALCANTE, 2017)

3.1.2 Sensor de Vibração

O Detector III da Fabricante FAG será o equipamento portátil utilizado para coleta dos dados de vibração deste experimento. O dispositivo é de fácil utilização e tem um amplo uso na indústria. A figura 21 mostra um kit do detector vendido de maneira comercial.

Figura 21 – Detector III FAG.



Fonte: SCHAEFFLER, 2023

O aparelho vem com configurações pré-instaladas, de acordo com a norma ISO 10816. Por sua portabilidade, é compatível para coleta de dados com diversos equipamentos, como bombas, motores elétricos, *spindles*, compressores, redutores, etc. Nele, é possível utilizar a função de rotas, que funciona como um caminho virtual nas configurações do aparelho, semelhante ao caminho físico em que o operador deverá percorrer coletando os dados de vibração.

É com o auxílio do *software Trendline*), que se estabelece a rota de medição. Antes da coleta dos dados, os pontos de medição devem ser nomeados e baixados para o detector de vibração. Após isso, o operador irá percorrer a rota, logo depois os dados serão transferidos para *software* para posterior análise.

3.1.3 Alicate Wattímetro

Para medições da potência elétrica consumida pela bancada, será utilizado o Alicate Wattímetro. O modelo escolhido foi o ET-4091. Nele é possível medir tensão (V), corrente (A), potência (kW), fator de potência, etc. A principal funcionalidade deste equipamento é a possibilidade de medição direta da potência elétrica de algum sistema trifásico ou monofásico. Essa medição é realizada utilizando a "garra" do equipamento para medir a corrente e as pontas de provas para medir a tensão de maneira simultânea.

Além disso, possui uma interface USB que possibilita a geração de laudos e relatórios. O *software* utilizado pelo aparelho é o *DMM Data Logger Bs157*. A figura 22 exibe um modelo do equipamento.

Figura 22 – Imagem do Wattímetro.



Fonte: (MINIPA, 2024)

3.2 EXPERIMENTOS

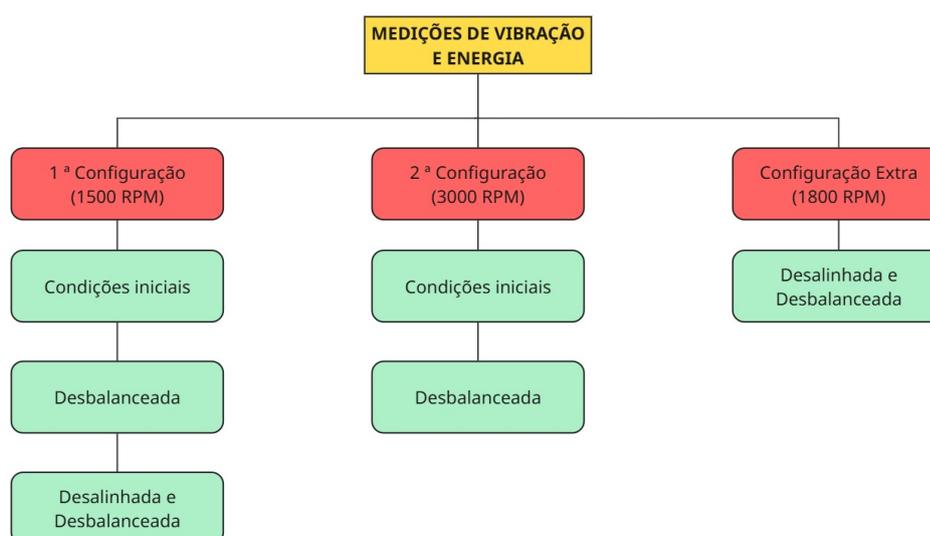
Para a realização dos experimentos e coleta dos dados, vão ser efetuadas medições em três configurações de velocidades diferentes, uma com 1500 RPM, outra com 3000 RPM e outra configuração extra com 1800 RPM. Portanto, serão medidos os dados com a bancada nas condições iniciais. Logo depois, um desbalanceamento será provocado propositalmente, e por último, mesclando um desbalanceamento com desalinhamento proposital.

A priori, foi pensado em coletar os dados dos três casos de condição da bancada (condições iniciais; desbalanceada; desbalanceada e desalinhada) para as duas primeiras configurações de velocidade citadas no parágrafo anterior (1500 RPM e 3000 RPM). Porém, após o início das atividades, percebeu-se uma grande instabilidade do equipamento, à medida que a velocidade era elevada, no caso em que a bancada estava desbalanceada e desalinhada. Logo, não seria seguro testar este caso na velocidade de 3000 RPM.

Desse modo, apenas as medições nas condições iniciais e com a bancada desbalanceada foram aferidas para 3000 RPM. Sendo assim, a velocidade mais alta, que não gerou perigo à operação de medição, foi de 1800 RPM. Por conseguinte, essa velocidade foi escolhida para uma configuração extra, a fim de gerar mais dados para a análise do trabalho.

Assim, foi elaborado um quadro com a organização dos casos aferidos em cada configuração de velocidade, com foco em deixar mais didática a visualização das medições realizadas na bancada. A figura 23 apresenta o quadro citado:

Figura 23 – Organização das Medições.



Fonte: Autor

Espera-se que, no caso inicial de ambas as configurações, os níveis de vibração

estejam dentro dos padrões de tolerância de vibração das normas supracitadas e o consumo de energia seja o mais baixo. Portanto, esse será o "ponto zero", ou seja, a referência frente aos dados medidos com as outras disposições do equipamento.

Como citado anteriormente, o desbalanceamento é conseguido através da adição de massas predefinidas nos flanges das extremidades do elemento girante da bancada. Desse modo, o eixo de inércia do componente é deslocado em relação ao eixo de rotação, fazendo com que os níveis de vibração do equipamento fiquem mais elevados. O desalinhamento é provocado por meio do mecanismo de movimento do motor (item 14 da tabela 2).

As informações analisadas comparativamente neste trabalho serão a velocidade de rotação, espectro de vibração da velocidade em função da frequência de vibração, velocidade RMS, aceleração efetiva, potência elétrica e energia consumida.

Para configurar as velocidades de rotação da bancada foi utilizado um inversor de frequência (conforme citado na seção 3.1.1). Sendo assim, para obter as três velocidades citadas anteriormente (1500 RPM, 3000 RPM e 1800 RPM) foi necessário configurar o inversor com sua frequência em Hertz. Seguindo a equação (1) abaixo é possível calcular os valores de frequências que foram utilizados:

$$RPM = \frac{f \times 120}{N_p} \quad (1)$$

Onde:

- RPM = Rotações por minuto;
- f = Frequência do inversor;
- N_p = Número de pólos do motor.

Desse modo, o motor do sistema possui 2 pólos. Por consequência, as frequências que serão inseridas no inversor de frequência serão 25 *Hz*, 30 *Hz* e 50 *Hz*.

Os pontos de medição adotados neste trabalho foram semelhantes aos da figura 17: Ponto 1 - Motor (próximo do rolamento do lado do acoplamento), Ponto 2 - Mancal do lado do acoplamento (LA) e o Ponto 3 - Mancal do lado oposto ao acoplamento (LOA). Cada ponto de medição obterá três leituras, são elas: na direção Radial Vertical (V), Radial Horizontal (H) e Axial (A).

3.2.1 1ª Configuração - 1500 RPM

Nesse primeiro caso, a bancada foi submetida à velocidade de rotação de 1500 RPM. Foram aferidos os dados de vibração e energia elétrica nas condições iniciais, com a bancada desbalanceada e depois com a bancada desbalanceada e desalinhada.

Sendo assim, utilizou-se o alicate wattímetro para medição da potência elétrica instantânea quando a rotação do motor ficou estabilizada, conforme imagens que serão mostradas abaixo. Enquanto isso, o detector III foi acoplado nos pontos de medição. O

aparelho medidor de vibração coletou os dados que foram inseridos no *Trendline* para o processamento dos dados e visualização dos dados e espectros de vibração.

3.2.2 2ª Configuração - 3000 RPM

Nessa segunda configuração também foram medidos os dados de vibração e consumo de energia da bancada. Porém, com a velocidade de rotação configurada em 3000 RPM. Similarmente ao caso da seção 3.2.1, também aferiu-se nas condições iniciais e com o desbalanceamento. O caso juntando desbalanceamento e desalinhamento não foi medido devido a questões de segurança da operação.

3.2.3 Configuração Extra - 1800 RPM

Para esta etapa, a bancada estava desbalanceada e desalinhada e foi sendo elevada a velocidade de rotação da mesma até chegar no valor mais alto em que não compromettesse a segurança dos operadores da medição. Com essa combinação, foram medidos também os dados de energia e vibração na velocidade de 1800 RPM.

3.3 CÁLCULO DO CONSUMO DE ENERGIA

O consumo de energia foi calculado de acordo com as informações da ANEEL, encontradas em seu *site* (ANEEL, 2025). Para a estimativa do consumo, foi considerado o motor trabalhando durante $\frac{2}{3}$ do dia, o que representa 16 horas, durante 18 meses de 30 dias. A escolha de 18 meses é devido ao tempo de garantia de motores elétricos que o fabricante WEG define para seus consumidores (WEG EQUIPAMENTOS ELÉTRICOS S/A, 2025).

Considerou-se como se o motor estivesse instalado em uma empresa pertencente ao grupo A3 (cliente industrial) com aplicação da tarifa azul, com tensão de fornecimento superior ou igual a 69kV. Desse modo, o regime tarifário será o horossazonal, que consiste na utilização de horários (postos) de ponta e fora ponta (NEOENERGIA PERNAMBUCO, 2025).

Portanto, as tarifas adotadas foram obtidas pela distribuidora de energia do estado de Pernambuco (NEOENERGIA PERNAMBUCO, 2025), são elas:

- TE_{NP} (R\$/kWh) = 0,5107 (Taxa de energia na ponta);
- TE_{FP} (R\$/kWh) = 0,31561 (Taxa de energia fora da ponta);
- $TUSD_{NP}$ (R\$/kW) = 8,09 (Taxa de utilização do sistema de distribuição na ponta, relativa a demanda);
- $TUSD_{FP}$ (R\$/kW) = 7,99 (Taxa de utilização do sistema de distribuição fora da ponta, relativa a demanda);

- $TUSD_{NP}$ ($R\$/kWh$) = 0,04256 (Taxa de utilização do sistema de distribuição na ponta, relativa ao consumo);
- $TUSD_{FP}$ ($R\$/kWh$) = 0,04256 (Taxa de utilização do sistema de distribuição fora da ponta, relativa ao consumo);

O consumo de energia elétrica na ponta e fora ponta é calculado pelas equações (2) e (3), respectivamente:

$$Consumo_{NP} (kWh) = Demanda (kW) \times Tempo (h) \times Dias \quad (2)$$

$$Consumo_{FP} (kWh) = Demanda (kW) \times Tempo (h) \times Dias \quad (3)$$

O consumo na ponta é calculado pela quantidade de energia elétrica consumida das 17:30h às 20:30h, logo, 3 horas por dia. Desse modo, o restante das horas de funcionamento (13 horas) serão de consumo fora da ponta.

Sendo assim, o custo da energia elétrica será calculado pela equação (4):

$$\begin{aligned} Custos (R\$) = & [Consumo_{NP} (kWh) \times TE_{NP} (R\$/kWh) + Consumo_{FP} (kWh) \\ & \times TE_{FP} (R\$/kWh)] + [Consumo_{NP} (kWh) \times TUSD_{NP} (R\$/kWh) \\ & + Consumo_{FP} (kWh) \times TUSD_{FP} (R\$/kWh)] + [Demanda (kW) \\ & \times TUSD_{NP} (R\$/kW) + Demanda (kW) \times TUSD_{FP} (R\$/kW)] \end{aligned} \quad (4)$$

4 RESULTADOS

Neste trabalho foram adotados três pontos de medição de vibração na bancada didática; são eles:

1. Ponto 1: Motor - Lado do Acoplamento (LA);
2. Ponto 2: Mancal - Lado do Acoplamento (LA);
3. Ponto 3: Mancal - Lado Oposto ao Acoplamento (LOA)

Foram realizadas 3 medições em cada ponto. Essas medições são distribuídas em: direção vertical, horizontal e axial (V, H e A, respectivamente). Portanto, nas seções abaixo será mostrado o espectro de vibração coletado em função da Velocidade x Frequência, a potência ativa instantânea (demanda) e também o cálculo do custo da energia elétrica do funcionamento de 16 horas por dia, durante 18 meses desse motor, para cada caso.

4.1 1ª CONFIGURAÇÃO - MOTOR COM 1500 RPM

Ao colocar o inversor na frequência de 25 *Hz*, foi permitido o início das medições da primeira configuração.

4.1.1 1º Caso - Condições iniciais

Nesse primeiro caso, foram medidas a vibração e a demanda (potência) com o motor da bancada com rotação de 1500 RPM. As medições nessas condições iniciais irão servir de base para comparar com os dois outros casos mostrados à frente.

Sendo assim, as informações de velocidade RMS, potência elétrica mensurada, consumo na ponta (NP) e fora ponta (FP) e, por fim, o valor pago pelo intervalo de tempo definido na seção 3.3, podem ser vistos no quadro da figura 24 abaixo.

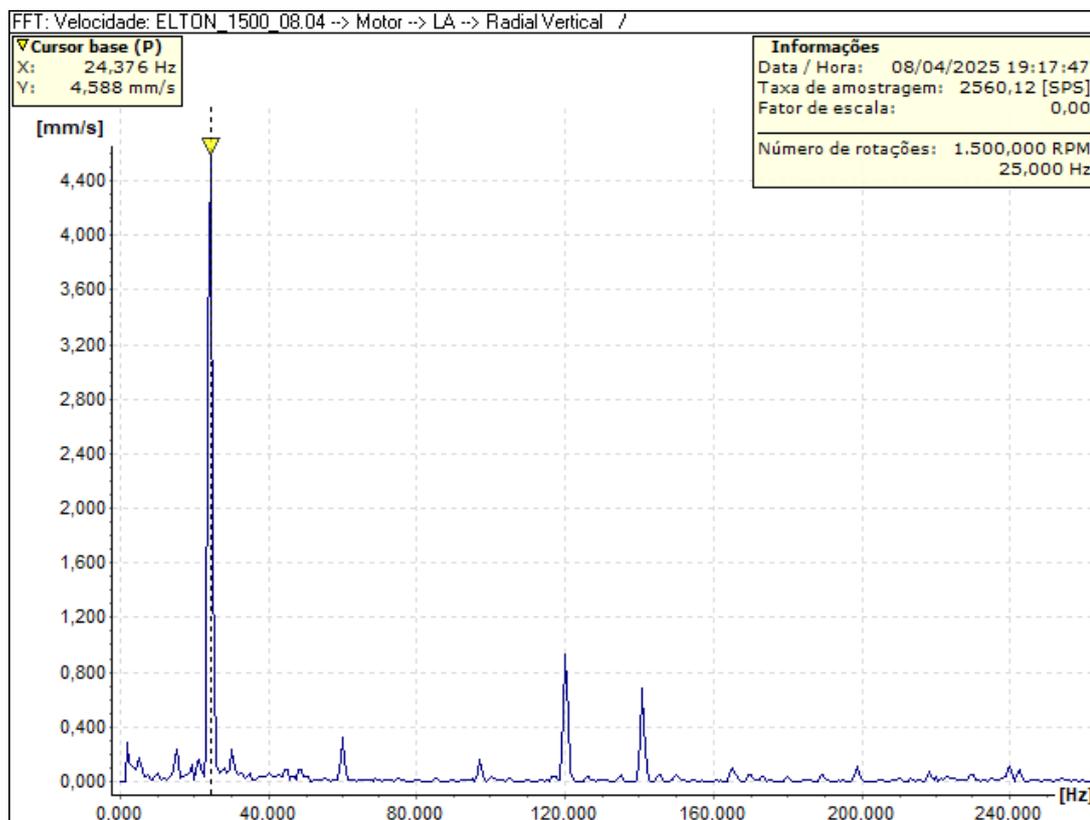
Figura 24 – Quadro de medições 1ª configuração - Condições Iniciais

ENERGIA		1ª CONFIG. (CONDIÇÕES INICIAIS) - 1500 RPM			
		MEDIÇÕES (Vel. RMS mm/s)			
		LOCAL	A	H	V
Potência (kW)	0,0487	MOTOR-LA	1,09	1,04	3,48
Energia NP (kWh)	78,894	MANCAL-LA	0,94	0,6	3,06
Energia FP (kWh)	341,874	MANCAL-LOA	1,28	1,22	2,09
Valor pago	R\$ 166,88				
		1ª CONFIG. (CONDIÇÕES INICIAIS) - 1500 RPM			
		MEDIÇÕES (Acel. Efetiva RMS mg)			
		LOCAL	A	H	V
		MOTOR-LA	211,88	263,31	170,08
		MANCAL-LA	163,55	349,25	374,46
		MANCAL-LOA	168,88	539,7	466,58

Fonte: Autor

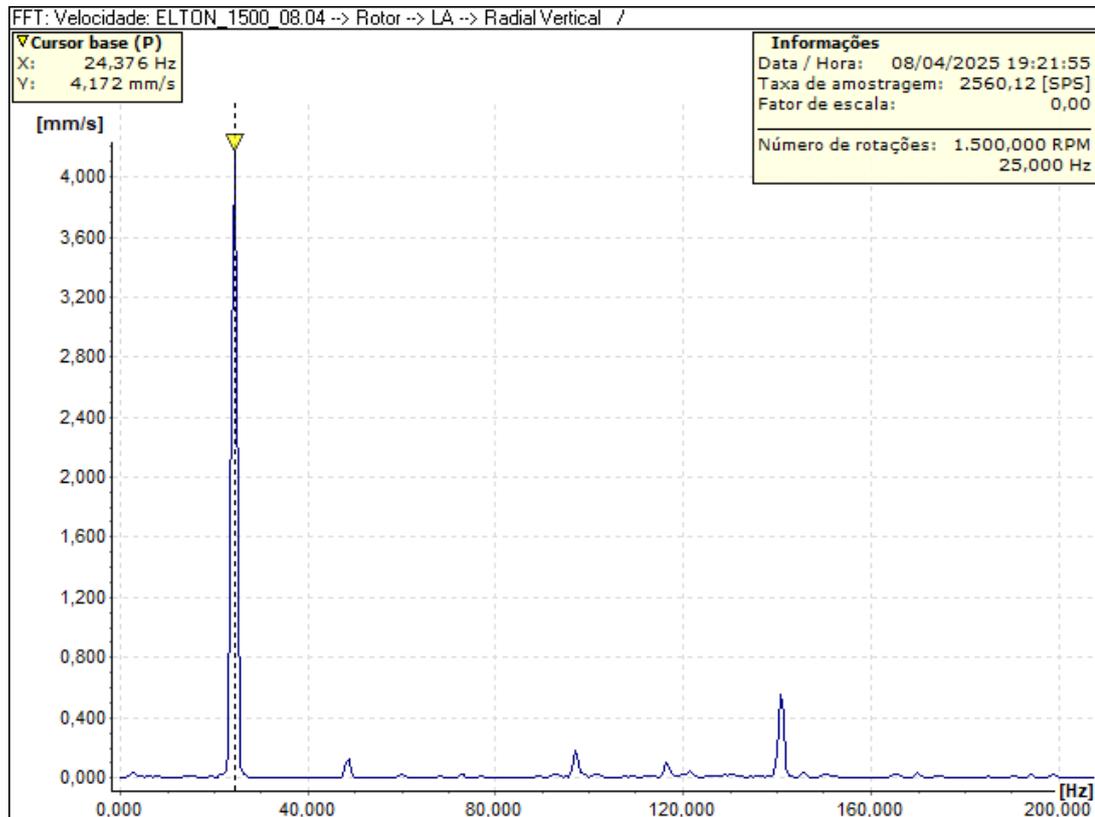
Observa-se que, de acordo com a Norma 10816, os níveis de vibração estão um pouco elevados na componente radial vertical dos três pontos de medição. Uma vez que a velocidade RMS passou de 1,8 mm/s. Nesse caso, poderia ser realizado um balanceamento mais refinado para tentar diminuir os valores em amarelo. Porém, foi optado por seguir com essas condições como base de comparação para o resto dos testes, devido a ausência de equipamentos que pudessem realizar uma correção no aparato. As figuras 25 e 26 mostram as assinaturas de vibração dos dois piores casos.

Figura 25 – Espectro de vibração do Motor LA Radial Vertical - Condições Iniciais



Fonte: Autor

Figura 26 – Espectro de vibração do Rotor LA Radial Vertical - Condições Iniciais



Fonte: Autor

Como visto anteriormente, na seção 2.3.2.1, o desbalanceamento tem um sintoma de vibração característica na velocidade de rotação do eixo (1X). Sendo assim, nas figuras 25 e 26 existe uma amplitude de vibração alta, em relação a outros picos, na frequência de rotação do eixo em ambos os casos. Portanto, há um leve desbalanceamento nas condições encontradas da bancada didática.

Nesse caso, o motor, após a rotação estar estabilizada, demanda uma potência elétrica de 0,0487 kW (figura 27), logo, chegou-se a um consumo monetário de R\$ 166,88 em 18 meses.

Figura 27 – Potência Elétrica Aferida - Condições Iniciais



Fonte: Autor

4.1.2 2º Caso - Desbalanceada

No caso número 2, a bancada continua na mesma rotação de 1500 RPM, só que com um desbalanceamento provocado. Desse modo, foram feitas as medições de potência elétrica e de vibração do equipamento durante essa operação.

Na figura 28 vê-se os dados de vibração aferidos juntos com os cálculos de energia elétrica. Percebe-se uma vibração severa na componente vertical dos 3 pontos medidos, como mostram os valores de velocidade RMS.

Figura 28 – Quadro de medições 1ª configuração - Desbalanceada e Alinhada

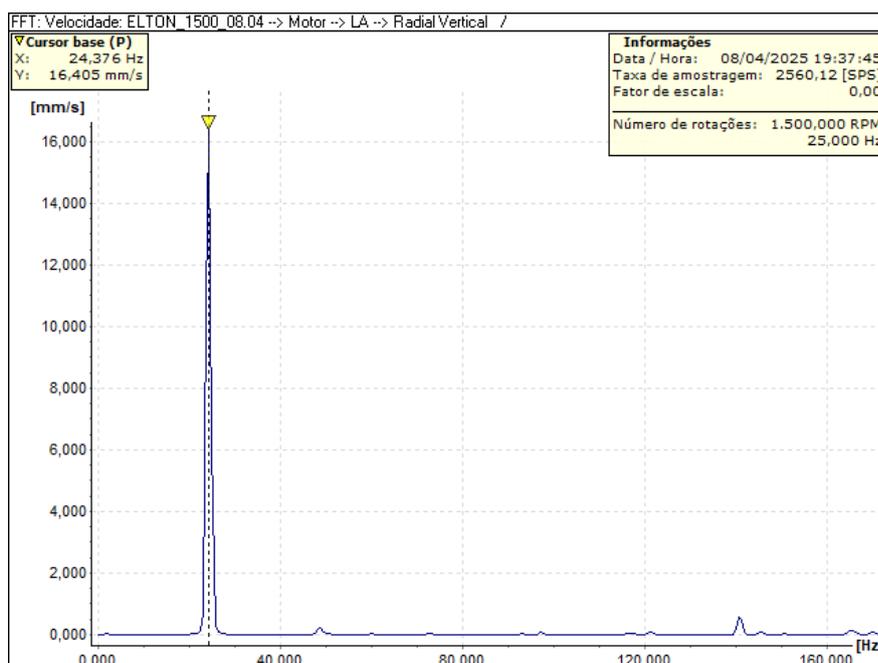
ENERGIA		1ª CONFIG. (DESBALANCEADA E ALINHADA) - 1500 RPM			
Potência (kW)	0,0527	MEDIÇÕES (Vel. RMS mm/s)			
Energia NP (kWh)	85,374	LOCAL	A	H	V
Energia FP (kWh)	369,954	MOTOR-LA	1,34	2,97	11,88
Valor pago	R\$ 180,59	MANCAL-LA	0,94	1,88	11,36
% de Energia Perdida	8,21%	MANCAL-LOA	1,93	1,9	7,74

1ª CONFIG. (DESBALANCEADA E ALINHADA) - 1500 RPM			
MEDIÇÕES (Acel. Efetiva RMS mg)			
LOCAL	A	H	V
MOTOR-LA	259,94	410,4	131,02
MANCAL-LA	192,80	345,82	379,73
MANCAL-LOA	165,86	494,13	515,37

Fonte: Autor

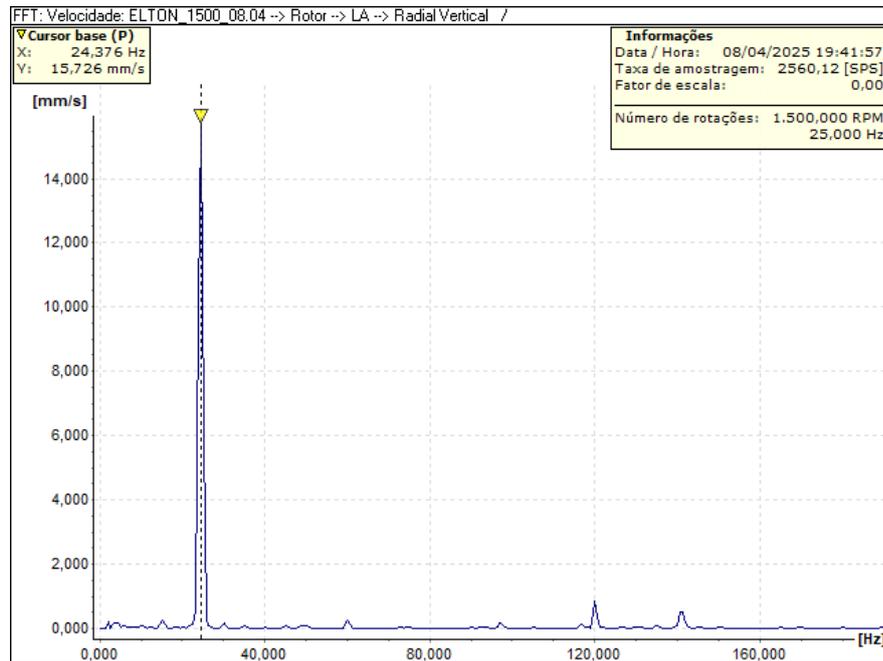
Nessas condições, pode-se observar nas figuras 29 e 30 os espectros de vibração apresentados. Percebe-se que a condição do desbalanceamento (pico em 1X) está mais acentuada, cerca de quatro vezes maior, após deixar a bancada propositalmente nessa condição. Confirmando assim, os sintomas de um desbalanceamento severo, sinalizado primeiramente pela velocidade RMS no quadro 28.

Figura 29 – Espectro de Vibração do Motor LA na Radial Vertical - Desbalanceada



Fonte: Autor

Figura 30 – Espectro de Vibração do Rotor LA na Radial Vertical - Desbalanceada



Fonte: Autor

A potência elétrica medida foi de 0,0527 kW, como pode ser visto na figura 31. Sendo assim, o valor pago durante 18 meses seria de R\$ 180,59, gerando um custo de 8,21% mais alto do que no 1º caso.

Figura 31 – Potência Elétrica Aferida - Desbalanceada



Fonte: Autor

4.1.3 3º Caso - Desbalanceada e Desalinhada

Nesse caso, além do desbalanceamento provocado, também foi incluído um desalinhamento. Utilizando os mesmos métodos descritos acima, foi confeccionado o quadro 32, que mostra também os dados de velocidade RMS, aceleração efetiva e custos de energia elétrica para o caso descrito no título desta seção.

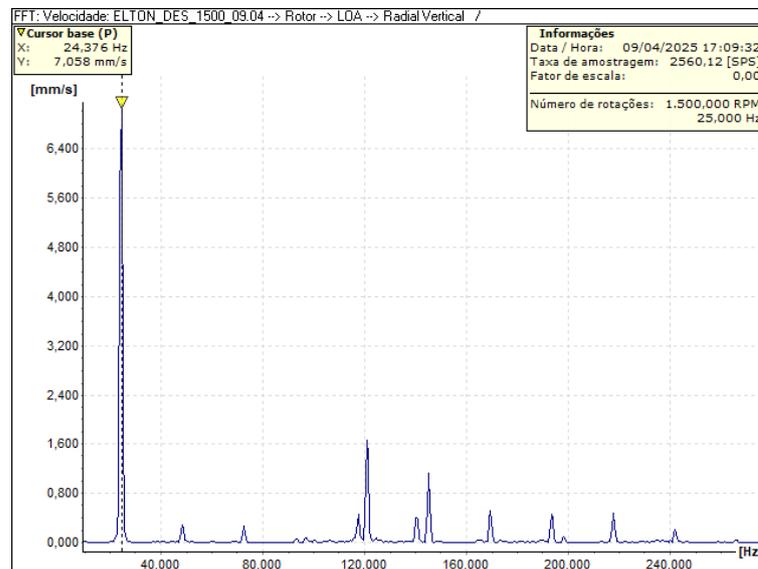
Figura 32 – Quadro de medições 1ª configuração - Desbalanceada e Desalinhada

ENERGIA		1ª CONFIG. (DESBALANCEADA E DESALINHADA) - 1500 RPM			
		MEDIÇÕES (Vel. RMS mm/s)			
		LOCAL	A	H	V
Potência (kW)	0,0578	MOTOR-LA	2,07	3,71	4,26
Energia NP (kWh)	93,636	MANCAL-LA	1,26	2,4	3,86
Energia FP (kWh)	405,756	MANCAL-LOA	1,65	4,01	5,65
Valor pago	R\$ 198,06	1ª CONFIG. (DESBALANCEADA E DESALINHADA) - 1500 RPM			
% de Energia Perdida	18,69%	MEDIÇÕES (Acel. Efetiva RMS mg)			
		LOCAL	A	H	V
		MOTOR-LA	240,62	319,02	166,88
		MANCAL-LA	192,37	361,23	379,21
		MANCAL-LOA	178,01	707,24	615,19

Fonte: Autor

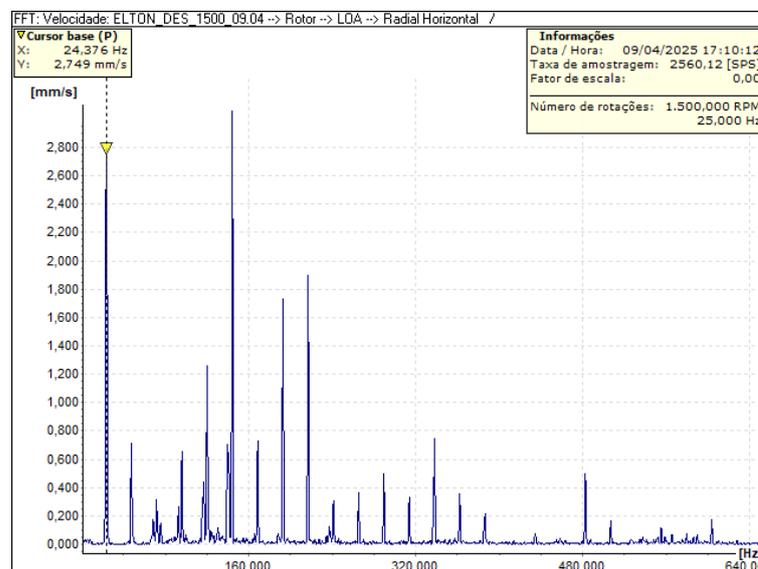
Desse modo, os espectros dos valores mais críticos de RMS, tanto de velocidade quanto de aceleração, podem ser vistos nas figuras 33 e 34.

Figura 33 – Espectro de Vibração do Rotor LOA na Radial Vertical - Desbalanceada e Desalinhada



Fonte: Autor

Figura 34 – Espectro de Vibração do Rotor LOA na Radial Horizontal - Desbalanceada e Desalinhada



Fonte: Autor

Observa-se que, com a combinação do desbalanceamento e desalinhamento, aumentou o número de picos nos espectros de vibração em valores de frequência de alta magnitude. Esse comportamento se deve à criação de folgas entre as partes mecânicas que precisaram ser movidas para criar o desalinhamento, como a base do motor, o acoplamento,

e o mancal (LA) e possui uma assinatura de vibração muito similar ao modelo discutido na seção 2.3.2.4. Pode haver também partes fixas atritando com partes rotativas, por conta do desalinhamento proposital, que se caracterizaria como roçamento. Esse defeito também foi discutido neste trabalho na seção 2.3.2.5.

No figura 32 foi possível verificar o valor obtido do custo de energia, conforme o método que foi utilizado neste trabalho. Sendo assim, o valor de energia gasto nessa condição seria de R\$ 198,06, o que representa um aumento de mais de 18% em comparação com as condições iniciais. A potência elétrica medida dessa condição pode ser vista na figura 35.

Figura 35 – Potência Elétrica Aferida - Desbalanceada e Desalinhada (1500 RPM)



Fonte: Autor

4.2 2ª CONFIGURAÇÃO - MOTOR COM 3000 RPM

Para essa seção, a bancada foi configurada em 3000 RPM. Logo, foram feitas medições em apenas dois casos, devido a questões de segurança, são eles: condições iniciais encontradas da bancada e com a bancada desbalanceada.

4.2.1 1º Caso - Condições iniciais

Com a bancada nas condições iniciais, foram feitas medições na rotação de 3000 RPM para a coleta de dados. Com os dados medidos na bancada nessa condição, foi montado o quadro da figura 36 com as informações de velocidade RMS, Aceleração efetiva RMS e os custos de energia elétrica.

Figura 36 – Medições 2ª Configuração - Condições Iniciais

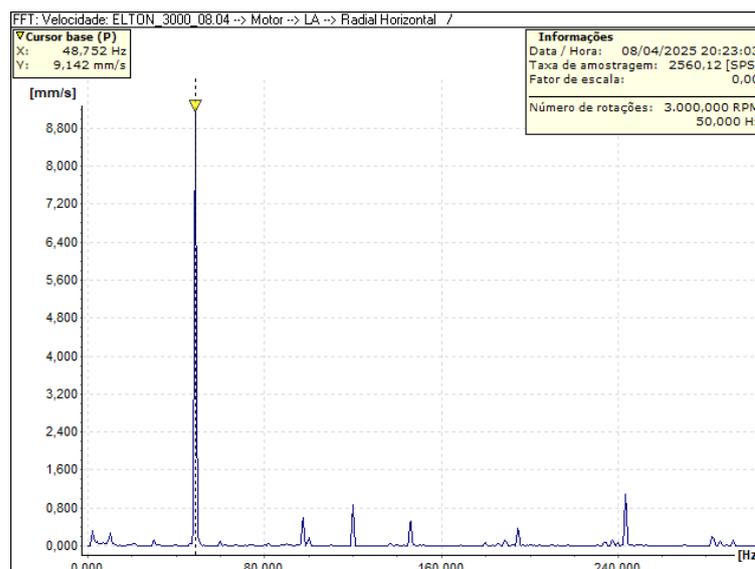
ENERGIA		2ª CONFIG. (CONDIÇÕES INICIAIS) - 3000 RPM			
		MEDIÇÕES (Vel. RMS mm/s)			
		LOCAL	A	H	V
Potência (kW)	0,1034	MOTOR-LA	0,96	6,69	1,32
Energia NP (kWh)	167,508	MANCAL-LA	1,17	5,61	1,49
Energia FP (kWh)	725,868	MANCAL-LOA	1,05	3,41	3,66
Valor pago	R\$ 354,32				

2ª CONFIG. (CONDIÇÕES INICIAIS) - 3000 RPM			
MEDIÇÕES (Acel. Efetiva RMS mg)			
LOCAL	A	H	V
MOTOR-LA	326,29	415,35	333,04
MANCAL-LA	377,79	1042,93	930,66
MANCAL-LOA	377,96	1315,75	1140,75

Fonte: Autor

Desse modo, na figura 37 vê-se o espectro de vibração mais crítico encontrado durante as medições realizadas na bancada durante esse caso. É possível visualizar um pico na componente 1X (frequência do eixo), que se caracteriza como desbalanceamento. É um pico de amplitude cerca de duas vezes maior do que na seção 4.1 para o mesmo caso, porém, agora com a velocidade duas vezes maior do mesmo modo.

Figura 37 – Espectro de Vibração do Motor LA na Radial Horizontal - Condições Iniciais



Fonte: Autor

Na figura 36 foi possível visualizar o custo da energia elétrica, de acordo com o método supracitado. A medição da potência elétrica desse caso é vista na figura 38. Desse

modo, foi obtido o valor de R\$ 354,32. Logo, esse valor servirá como base de comparação para os outros casos dessa configuração.

Figura 38 – Potência Elétrica Aferida - Condições Iniciais (3000 RPM)



Fonte: Autor

4.2.2 2º Caso - Desbalanceada

No segundo caso, tem-se a bancada desbalanceada propositalmente. Com os dados obtidos a partir das medições, foi montado o quadro da figura 39, contendo os dados de velocidade, aceleração e custo de energia elétrica.

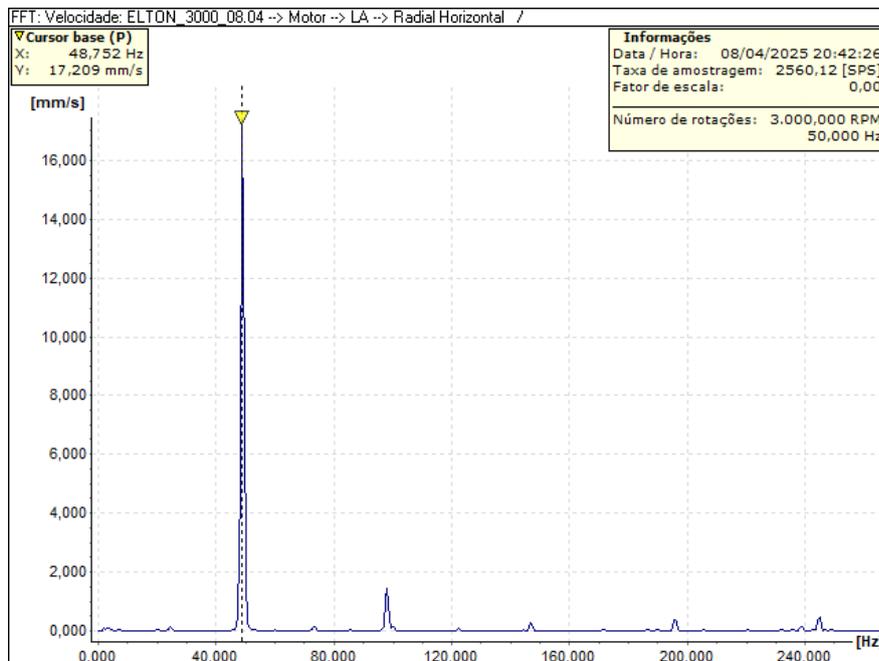
Figura 39 – Medições 2ª Configuração - Desbalanceada (3000 RPM)

ENERGIA		2ª CONFIG. (DESBALANCEADA E ALINHADA) - 3000 RPM			
		MEDIÇÕES (Vel. RMS mm/s)			
		LOCAL	A	H	V
Potência (kW)	0,1131	MOTOR-LA	1,43	13,19	6,25
Energia NP (kWh)	183,222	MANCAL-LA	0,86	12,25	5,01
Energia FP (kWh)	793,962	MANCAL-LOA	1,45	7,01	5,33
Valor pago	R\$ 387,56	2ª CONFIG. (DESBALANCEADA E ALINHADA) - 3000 RPM			
% de Energia Perdida	9,38%	MEDIÇÕES (Acel. Efetiva RMS mg)			
		LOCAL	A	H	V
		MOTOR-LA	388,17	609,35	347,08
		MANCAL-LA	379,09	1056,67	1206,68
		MANCAL-LOA	454,68	1441,13	1242,84

Fonte: Autor

Sendo assim, na figura 40 pode-se ver o espectro de vibração mais crítico. Observa-se mais uma vez características clássicas do comportamento vibracional do desbalanceamento, como já era esperado.

Figura 40 – Espectro de Vibração do Motor LA na Radial Horizontal - Desbalanceada (3000 RPM)



Fonte: Autor

Na parte de energia elétrica foi medido 0,1131 kW (figura 41). Esse valor irá gerar

um consumo de energia que custará R\$ 387,56 durante 18 meses. Representa uma perda financeira de mais de 9% para esse caso em relação às condições iniciais da bancada.

Figura 41 – Potência Elétrica Aferida - Desbalanceada (3000 RPM)



Fonte: Autor

4.3 CONFIGURAÇÃO EXTRA - MOTOR COM 1800 RPM

Como na última seção, por questões de segurança, não foi possível realizar o teste com a bancada desbalanceada e desalinhada em 3000 RPM, foi inserido um caso extra mesclando também o desbalanceamento e desalinhamento com uma faixa de velocidade segura para as medições. Logo, foram medidos os mesmos dados dessa configuração com a velocidade de 1800 RPM.

4.3.1 Caso único - Desbalanceada e Desalinhada

Também pode ser visto no quadro da figura 42 os dados coletados de velocidade RMS, aceleração efetiva RMS e custos com energia elétrica. Nas figuras 43 e 44 veem-se os espectros mais críticos desse caso.

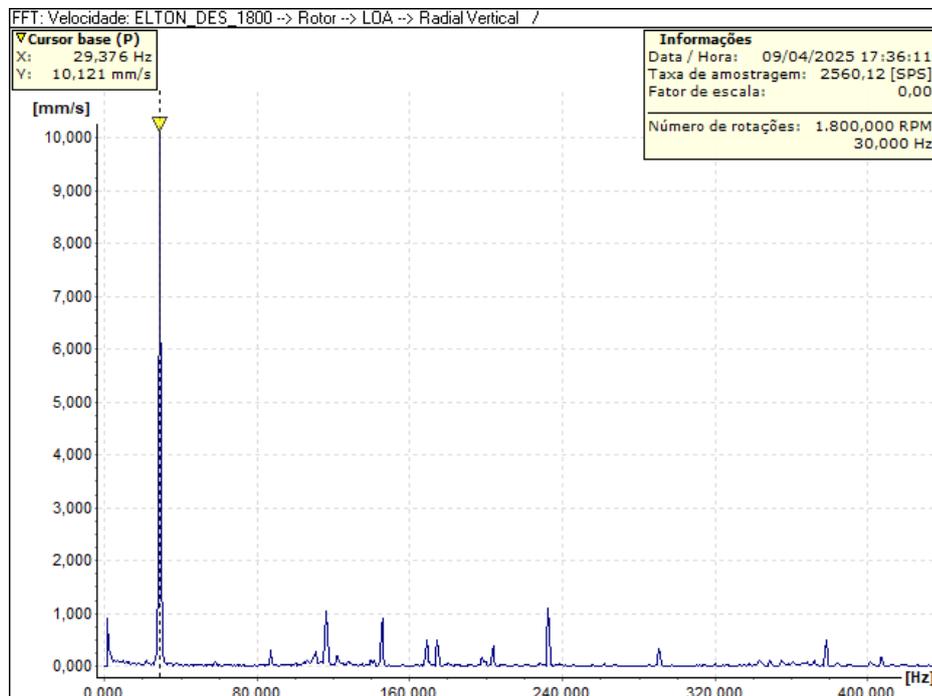
Figura 42 – Medições Configuração Extra (1800 RPM) - Desbalanceada e Desalinhada

ENERGIA		CONFIG. EXT (DESBALANCEADA E DESALINHADA) - 1800 RPM			
Potência (kW)	0,0712	MEDIÇÕES (Vel. RMS mm/s)			
Energia NP (kWh)	115,344	LOCAL	A	H	V
Energia FP (kWh)	499,824	MOTOR-LA	2,79	3,7	6,26
Valor pago	R\$ 243,98	MANCAL-LA	1,13	3,64	3,18
		MANCAL-LOA	2,37	4,85	8,49

CONFIG. EXT (DESBALANCEADA E DESALINHADA) - 1800 RPM			
MEDIÇÕES (Acel. Efetiva RMS mg)			
LOCAL	A	H	V
MOTOR-LA	474,26	737,22	232,23
MANCAL-LA	236,32	520,09	532,09
MANCAL-LOA	279,53	1060,61	880,26

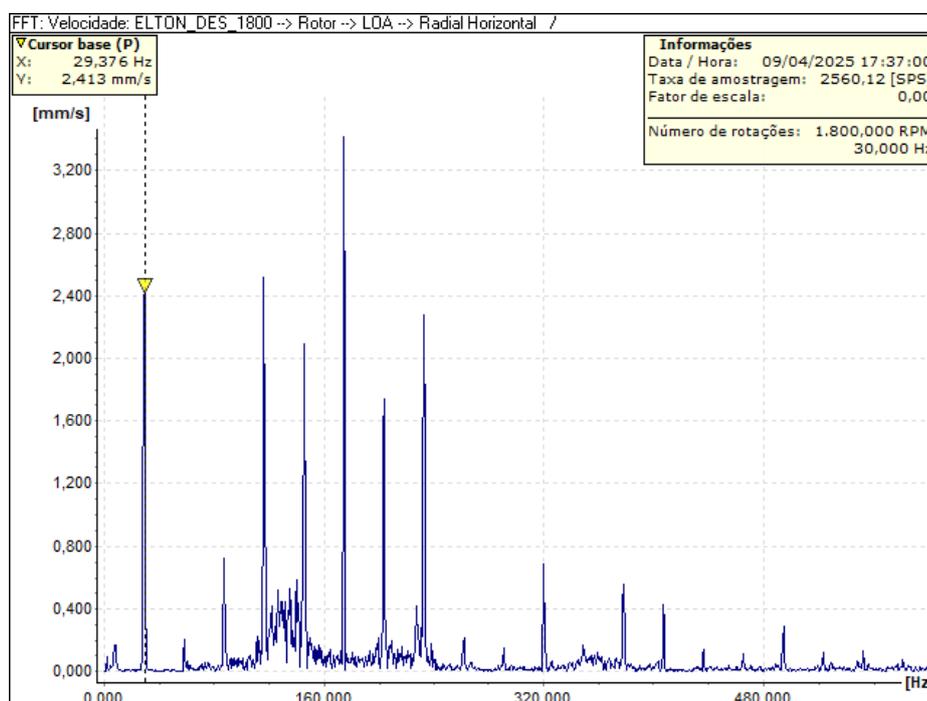
Fonte: Autor

Figura 43 – Espectro de Vibração do Rotor LOA na Radial Vertical - Desbalanceada e Desalinhada (1800 RPM)



Fonte: Autor

Figura 44 – Espectro de Vibração do Rotor LOA na Radial Horizontal - Desbalanceada e Desalinhada (1800 RPM)



Fonte: Autor

Na perspectiva de custos de energia, o valor calculado foi de R\$ 243,98 para as condições deste caso. Comparando com o caso da seção 4.1, vê-se que ao subir a velocidade em 20% o valor pago de energia subiu em 23,2%. Conforme potência elétrica aferida na figura 45.

Figura 45 – Potência Elétrica Aferida - Desbalanceada e Desalinhada (1800 RPM)



Fonte: Autor

5 CONCLUSÃO

Portanto, este trabalho desenvolveu o tema da importância da análise de vibração no consumo de energia elétrica, a qual provou ser uma ferramenta valiosa para o acompanhamento das condições de máquinas rotativas. Conseguiu-se realizar os objetivos que foram estipulados na seção 1.1: coletar os dados de velocidade e aceleração (RMS), coletar os espectros de vibração das medições realizadas, aferir a potência elétrica e calcular o consumo de energia elétrica de cada configuração da bancada. Após isso, foi analisado o impacto financeiro no consumo que um motor vibrando pode causar.

Para alcançar esses objetivos, foram montadas 3 configurações diferentes a fim de verificar o comportamento vibracional e energético do sistema. As técnicas de medição de vibração foram baseadas nas recomendações de normas técnicas e na experiência dos autores citados no capítulo 2. Para o cálculo do consumo e custos com energia elétrica, utilizaram-se informações disponibilizadas pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL, 2025) e as tarifas obtidas a partir de uma tabela da Neoenergia Pernambuco (NEOENERGIA PERNAMBUCO, 2025). Após esse cálculo, constatou-se que uma máquina com vibrações excessivas consome mais energia do que em operações normais.

Com isso, foi mostrado que para a configuração com velocidade mais baixa (1500 RPM) houve um aumento de 8,21% no valor pago de energia para o caso do desbalanceamento. No caso da bancada desbalanceada e desalinhada, o aumento no consumo foi de 18,69%. Já para a bancada com uma velocidade mais elevada (3000 RPM), o aumento para o desbalanceamento foi de 9,38% (para essa configuração não houve combinação de desbalanceamento e desalinhamento). Na configuração extra (bancada com 1800 RPM) a bancada estava desbalanceada e desalinhada e chegou ao valor de R\$ 243,98. Neste caso, foi possível verificar que ao aumentar a velocidade, o consumo de energia também sobe.

Desse modo, ficou constatada a importância do monitoramento das condições de máquinas rotativas, com base na teoria mostrada no capítulo 2. Pois, além de poder prolongar a vida útil dos ativos, economizando em troca de peças, evitando paradas não planejadas, pode também ter excelentes resultados no valor pago pela energia elétrica, aumentando assim o rendimento das máquinas rotativas de um planta industrial. Viu-se também que conforme a velocidade do motor aumenta sob um mesmo regime de falha, o custo da energia aumentará mais.

Para investigações futuras, sugere-se a expansão deste estudo por meio de testes com diferentes modelos de acoplamento e outros tipos de mancais de rolamentos. A análise do comportamento vibracional e do consumo elétrico com rolamentos defeituosos (conhecidos) seria valiosa para verificar as assinaturas de vibração de cada defeito e também mensurar as perdas energéticas por esses motivos. Adicionalmente, a coleta e comparação de dados em motores que estão em campo ao longo do tempo forneceriam resultados reais sobre o desgaste e a performance de máquinas em pleno funcionamento, contribuindo para o

desenvolvimento de soluções mais eficazes de monitoramento e manutenção. Por fim, a utilização de motores de grande porte também fariam uma análise bastante notável.

REFERÊNCIAS

ANEEL, Agência Nacional de Energia Elétrica. **Custo da energia que chega aos consumidores**. Disponível em: <https://www.gov.br/aneel/pt-br/assuntos/tarifas/entenda-a-tarifa/custo-da-energia-que-chega-aos-consumidores>. Acesso em: 9 fev. 2025.

CAVALCANTE, Laertty Moraes. **BANCADA DIDÁTICA PARA TESTES E ESTUDOS DAS VIBRAÇÕES EM MÁQUINAS ROTATIVAS ACOPLADAS**. 2017. Dissertação de Mestrado – UFPE, Recife.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE). **Matriz Energética e Elétrica**. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/abcdenergia/matriz-energetica-e-eletrica%5C#ELETRICA>. Acesso em: 6 ago. 2023.

FRISWELL, Michael I.; PENNY, John E. T.; GARVEY, Seamus D.; LEES, Arthur W. **Dynamics of Rotatint Machines**. New York, NY: Cambridge University Press, 2010.

GONÇALVES, A. C. ALBUQUERQUE. M. C. F. Revisão Bibliográfica das Técnicas de Análise de Partículas de Desgastes em Óleos e Análise de Vibrações Aplicadas na Manutenção Preditiva de Máquinas e Equipamentos. **UNESP – Universidade do Estado de São Paulo**, 2015.

GUIA DE MOTORES. **Principais Falhas em Motores**. Disponível em: https://www.guiademotores.com/index.php?option=com_content&view=article&id=93&catid=16. Acesso em: 17 ago. 2025.

JESUS SILVA, Derick Henrique de. **PROCESSAMENTO DE SINAIS PARA MONITORAMENTO DE VIBRAÇÕES EM UNIDADES GERADORAS HIDRELÉTRICAS**. 2013. Dissertação de Mestrado – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte.

JUNIOR, Joe Luiz Rossdeutscher. **ANÁLISE DE VIBRAÇÃO EM ROLAMENTOS INDUSTRIAIS**. 2018. Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação – UNIFACVEST, Lages.

KELLY, S. Graham. **Mechanical Vibrations: Theory and Applications**. 1st. Boston, MA: Cengage Learning, 2011. ISBN 978-0495667704.

MEIROVITCH, Leonard. **Fundamentals of Vibrations**. 1st. New York, NY: McGraw-Hill, 2001. ISBN 978-0070413435.

MINIPA. **Catálogo Geral**. [S.l.: s.n.], 2024. Catálogo do Fabricante. Disponível em: <https://www.minipa.com.br/catalogo-minipa>.

MIRSHAWKA, V. **Manutenção Preditiva: Caminho para zero defeitos**. São Paulo: McGraw-Hill, 1991.

NEOENERGIA PERNAMBUCO. **Composição Tarifária**. Disponível em: https://www.neoenergia.com/documents/d/pernambuco/neoenergia-pernambuco_tarifas-de-energia-eletrica-grupo-a_abril_2024_reh-3-325-pdf?download=true. Acesso em: 22 jan. 2025.

NETO, Arthur Palmeira Ripper. **MEDIÇÃO DE VIBRAÇÕES PARA MANUTENÇÃO PREDITIVA DE MÁQUINAS**. COPPE/UFRJ, 2006.

NTI AUDIO. **Transformação rápida de Fourier FFT - Noções básicas**. Disponível em: <https://www.nti-audio.com/pt/suporte/saber-como/transformacao-rapida-de-fourier-fft>. Acesso em: 29 jul. 2025.

OLIVEIRA, Ronivon Pereira de. **Análise de Vibração Nível I**. Goianésia-GO, 2020.

PREDIMEC CONSULTORIA EM MANUTENÇÃO. **Análise de Vibrações em Máquinas Rotativas**. Disponível em: <https://www.predimec.com.br/analise-vibracoes-maquinas-rotativas>. Acesso em: 29 ago. 2023.

RAO, S. S. **Mechanical Vibrations**. 6. ed. United Kingdom: Pearson Education Limited, 2018. P. 1147.

REVEL BOMBAS. **Bombas de Polpa Série SHD**. Disponível em: <https://revalbombas.com.br/produto/bombas-de-polpa-serie-shd/>. Acesso em: 29 ago. 2023.

ROCHA, Diego Lilargem. **ANÁLISE DE VIBRAÇÕES EM EQUIPAMENTOS ROTATIVOS DE UMA INDÚSTRIA ALIMENTÍCIA**. 2014. Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação – IFF, Campos dos Goytacazes.

SILVA, José Carlos Albuquerque da. **PROJETO, FABRICAÇÃO E TESTE DE UMA BANCADA DIDÁTICA PARA ESTUDOS DE DESALINHAMENTO, DESBALANCEAMENTO E VIBRAÇÕES MECÂNICAS EM MÁQUINAS ROTATIVAS ACOPLADAS**. 2016. Trabalho de Conclusão de Curso – Universidade Federal de Pernambuco, Recife.

SILVA, Lucas Staciaki da. **UMA ANÁLISE DE VIBRAÇÃO DE MANCAL DE BOMBA HIDRÁULICA CENTRÍFUGA BASEADA NA NORMA ISO 10816**. 2020. Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação – UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ, Guarapuava-PR.

SIMETRIZA BALANCEAMENTO INDUSTRIAL. **Entendo os tipos de desbalanceamento**. Disponível em:

<https://simetriza.com.br/2015/05/20/entendendo-os-tipos-de-desbalanceamento/>.

Acesso em: 21 jun. 2025.

SPAMER, Fernanda Rosa. **TÉCNICAS PREDITIVAS DE MANUTENÇÃO DE MÁQUINAS ROTATIVAS**. 2009. Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.

VIANA, H. R. G. **Planejamento e Controle da Manutenção**. 2. ed. Rio de Janeiro: Qualitymark Editora Ltda, 2022. P. 190.

WEG EQUIPAMENTOS ELÉTRICOS S/A. **Condições de fornecimento de garantia**. Disponível em: <https://static.weg.net/medias/downloadcenter/h34/h5e/WEG-condicoes-de-fornecimento-de-garantia-1-document-portuguese-web.pdf#:~:text=A%20WEG%20Equipamentos%20El%C3%A9tricos%20S,meses%20da%20data%20de%20fabrica%C3%A7%C3%A3o..>

<https://static.weg.net/medias/downloadcenter/h34/h5e/WEG-condicoes-de-fornecimento-de-garantia-1-document-portuguese-web.pdf#:~:text=A%20WEG%20Equipamentos%20El%C3%A9tricos%20S,meses%20da%20data%20de%20fabrica%C3%A7%C3%A3o..>

Acesso em: 6 jan. 2025.

WELFFGRANSCER, Arley da Silva. **UTILIZAÇÃO DA ANÁLISE DE VIBRAÇÃO PARA PREDIÇÃO DE FALHAS EM ROLAMENTOS AUTOCOMPENSADORES DE ESFERAS**. 2023. Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação – Instituto Federal do Espírito Santo, São Mateus-ES.

ZUCOTEC ELETRÔNICA INDUSTRIAL. **Reparo em Máquinas Operatrizes**.

Disponível em: <https://www.zucotec.com.br/reparo-maquinas-operatrizes/>. Acesso em: 3 set. 2023.