

Artigo

Projeto e desenvolvimento de uma bancada experimental para análise vibracional de máquina rotativa aplicada na manutenção preditiva

Mayke Sombra Barbosa ^[1], Rômulo Pierre Batista dos Santos ^[2]

^[1] Universidade Federal Rural do Semi-Árido, Engenharia mecânica; aluno; maykesbarbosa@gmail.com.

^[2] Universidade Federal Rural do Semi-Árido, Engenharia mecânica; orientador; romulopierre@ufersa.edu.br.

Resumo: Os movimentos oscilatórios de um equipamento ou movimento de rotação de componentes mecânicos é eventualmente referido a vibrações. A percepção de falhas desses componentes é um passo essencial para a redução de custo de manutenção. Para compreender os fenômenos envolvendo falhas, este trabalho procurou construir e caracterizar uma bancada para estudar falhas no conjunto de componentes mecânicos. Com a bancada foi possível testar o impacto de rolamentos defeituosos, nos dentes do conjunto de engrenagem, excentricidades entre outros problemas identificados. Os resultados foram obtidos por meio de medições realizadas com software SIGPRED e com ANALISADOR DE VIBRAÇÕES VIB SERIE 100/200 e também medições com um acelerômetro conectado a um osciloscópio acoplados a bancada de testes para coleta de dados do conjunto de componentes, gerando curvas características de suas vibrações. Através dos métodos de coleta e análise de curvas como técnica efetiva de manutenção preditiva, foi notável que as medições se aproximaram dos resultados obtidos por meio de cálculos realizados no MATLAB para avaliação de danos, caracterizando de maneira preditiva possíveis defeitos que podem ser tratados e corrigidos.

Palavras-chave: Elementos de máquinas, análise de vibrações, defeitos de componentes mecânicos.

1. INTRODUÇÃO.

As vibrações estão presentes na maioria das atividades humanas, muitas investigações foram motivadas pelas aplicações da vibração na área da engenharia como projeto de máquinas, fundações, estruturas, motores, turbinas e sistemas de controle [1]. Falhas iniciais em rolamentos e engrenagens se caracterizam por gerar sinais de vibração com baixa amplitude e alta frequência em relação a outras falhas, a velocidade e qualidade da produção industrial atualmente requerem máquinas com maior durabilidade e qualidade, necessitando que sejam mais eficientes e tenham cada vez menos paradas para manutenção [2]. Com a impossibilidade de se construir e montar componentes de máquinas isentos de imperfeições, surge nas máquinas o fenômeno de vibração [3].

As principais falhas que surgem em sistemas engrenados geralmente estão relacionadas com problemas existentes no dente ou no eixo, as falhas relacionadas ao dente podem ser oriundas de desgastes, riscos e trincas e as falhas relacionadas ao eixo podem ser devidas ao desalinhamento e desbalanceamento mecanismos de transmissão de potência são indispensáveis ao funcionamento da grande maioria das máquinas industriais [4]. Uma das principais fontes de excitação de um sistema vibratório é o componente instável do movimento angular rotativo de pares engrenados [5], entender os fenômenos de surgimento e

desenvolvimento de falhas nesses sistemas tem se tornado uma tarefa importante nas fases de projeto e manutenção, quanto ao aspecto de detecção de possíveis defeitos que podem ser monitorados através de técnicas de manutenção preditiva [4] e aquisição de dados.

A análise de vibração é um critério importante para o diagnóstico automático de falhas em processos de fabricação e programação de manutenção para vários equipamentos de fabricação [6]. Com a evolução da eletrônica, foi possível desenvolver equipamentos para coleta e análise de dados, visto que a conversão da vibração mecânica para um sinal eletrônico é o melhor caminho. O meio de conversão dos sinais mecânicos para sinais eletrônicos são os transdutores. O sinal de saída de um transdutor é proporcional a quão rápido (frequência) e a quão grande (amplitude) é o movimento [7] permitindo tratar dados coletados tanto no domínio do tempo e no domínio da frequência.

O presente trabalho tem por finalidade estudar a influência das proporções proveniente de defeitos em um conjunto de engrenagens caracterizando modelos de sinais de vibração, simulando o par em condições normais de operação com os cálculos analíticos realizados para chegar aos resultados, posteriormente, será feita a análise de vibração através um sistema de aquisição de dados usadas para analisar sinais vibratórios medidos para diferentes gravidades de defeitos.

1.1. Tipos de defeitos em Engrenagens.

As engrenagens são os componentes mais comuns em grande parte das máquinas, e devido a isto, se faz necessário a realização de estudos de ferramentas matemáticas que unidos a equipamentos de medição e processamento, venham a contribuir para detecção, identificação e localização de falhas nestes tipos de sistemas [3].

Segundo [4] encontra-se defeitos como montagens erradas, lubrificação deficiente, desgastes contaminação, desalinhamentos, excentricidades, entre outros. Estes defeitos, tendem a gerar um sinal de vibração no tempo com características de natureza escalonada, isto por causa da flexibilidade variando periodicamente, como há distribuição de carga entre diferentes pares de dentes engrenados esta variação é grande para as engrenagens de dentes retos e mais ainda para as engrenagens de dentes helicoidais. Deste modo pode se aprofundar nos desgastes como no estudo do pesquisador [8] que acompanhou um sistema de engrenagens responsável pelo acionamento por redutor comercial de engrenagens helicoidais, com um único par de redução e mancais de rolamento considerando a estrutura de uma máquina linear, de modo que com o sinal medido sobre os mancais possa ser considerado como o somatório da resposta estrutural referente a cada excitação, se pode estabelecer uma relação direta entre as frequências encontradas no sinal vibratório, suas análise tiveram como base o uso dos parâmetros os Giros dos eixos, engrenamento, desvio de forma do dentado, flutuação de carga no dentado, danos pontuais no dentado.

Defeitos excitam sistemas com bastante frequência, e é possível identificar a frequência de ressonância dos impactos causados com o uso de técnicas como envelope, análises gráficas em relação ao tempo (T) ou a Fast Fourier Transform (FFT). No uso de métricas estatísticas como a medida estatística usada com frequência nas análises de vibração é a raiz quadrada média (r.m.s.) bem como o método outros métodos, a Kurtosis é definida como o grau de pico de uma função de densidade de probabilidade $p(x)$ e matematicamente ou ainda o parâmetro FM4/ é a razão entre a curtose do sinal de diferença e a variância quadrada de uma caixa de câmbio saudável sinal de diferença. O sinal de diferença é calculado extraindo a malha das engrenagens, as frequências dos eixos, seus harmônicos e bandas laterais associadas da assinatura vibratória [9].

Dentre os principais defeitos apresentados cada um tem sua peculiaridade de acordo como impacta na atuação do sistema engrenado, por tanto, a identificação dos defeitos pode ser feita de uma maneira não só visual ou por métodos estatísticos. Considerando que as engrenagens possuem defeito com maior severidade que outros ao analisar um sistema engrenado através de um sistema de detecção vibratória alguns gráficos modelados através dos dados obtidos podem exibir com maior precisão os graus dos defeitos.

1.2. Métodos de processamento de sinais (Sistema de aquisição de dados).

O sinal pode ser visto como resultado da perturbação de um sistema ou da interação de sistema com outros sistemas físicos. As técnicas de análise no domínio do tempo processam o sinal de vibração e retornam um simples valor, indicando o estado de “saúde” do componente [3]. A análise vibratória usando vários métodos de processamento de sinal é a abordagem mais popular amplamente utilizada no monitoramento de condições e procedimentos de diagnóstico. Os sinais de vibrações que estes sistemas emitem são bem representativas no processo físico de funcionamento, e podem ser investigados através de modelos computacionais ou mesmo a partir de medidas reais das assinaturas de vibração em várias situações ou estágios de falhas [4]. Durante a detecção de um sinal vibratório existem situações que não fornece informações suficientes, fazendo-se necessário outros métodos para melhor caracterizar o sinal. Segundo o estudo do pesquisador [5] a formulação das equações de movimento de um sistema genérico de engrenagens no domínio da frequência requer o coeficiente da série de Fourier para os componentes da excitação da vibração.

Através da análise de sinais é possível transformar um sinal mecânico em um sinal elétrico correspondente e, com equipamento adequado, processar, desmembrar, enfim, manipulá-lo para que possa ser estudado como demonstra o pesquisador [10] que faz uso das séries de Fourier transformando o sinal analógico em uma soma de funções senoidais ou cossenoidais, sinais óbitos através da análise do comportamento de um conjunto mecânico, constituído de um motor, duas polias e uma correias. Optou-se por utilizar valores de RMS (Root Mean Square) de cada sinal o com os correios a 30Hz girando normalmente e outro sinal com desalinhamento e desgaste, é perceptível através dos dados gráficos apresentados pelo autor que o desalinhamento da correia causa um aumento substancial no valor RMS da vibração na direção transversal. Um resultado interessante é que o valor RMS na direção axial diminui.

2. METODOLOGIA.

2.1 MATERIAIS E MÉTODOS

Para obtenção dos dados vibracionais faz-se uso de uma bancada (M1) desenvolvida para análise vibracional de um par de engrenagens cônicas, planetária e satélite obtida de sucata estas foram retiradas de um diferencial de um veículo atua como uma caixa de redução, de forma a captar a velocidade do motor e a convertê-la em torque promovendo um melhor desempenho do veículo [11].

As engrenagens utilizadas tratam-se de pares cônico de dentes retos foram obtidos de um diferencial de kadett Monza com câmbio F16 1986-1990 idênticos, ambos em estado de conservação aceitável tendo em vista o recorrente desgaste proveniente de seu uso anterior. As falhas nestes elementos se iniciam através de deformação de asperezas ou outras irregularidades superficiais pois este fator tem uma grande importância no desgaste e no atrito encontrados durante o contato entre engrenagens [12]. Como pode ser visto na Figura 1 o estado de ambas engrenagens estão satisfatórias, pois, não indicam defeitos aparentes que possam influenciar de forma negativa a aquisição dos resultados.



(a)



(b)

Fonte: Autoria própria (2023).

Na Figura 1. (a) A engrenagem Planetária apresenta desgaste superficial no dentado. (b) A engrenagem Satélite apresenta pouca diferença visual entre a planetária, mostrando o desgaste aparente em contato com eixo.

Um parâmetro importante a ser avaliado durante o contato de engrenagens é sua velocidade de deslizamento, pois este fator é de uma grande importância na medição do desgaste atrito encontrados durante o contato entre elas [12,18], outros parâmetros importantes serão os defeitos aparentes de falha por desgaste de dentes de engrenagens [12], componentes de espectros são representados por frequência de engrenamento harmônico, bandas laterais, frequência de repetição dos dentes, frequência de montagem do conjunto, portanto, com o controle de velocidade de rotação e a observação dos defeitos aparentes em toda a bancada serão no vistos durante a plotagem dos gráficos.

Na sequência são apresentados os parâmetros usados como base neste estudo e a resposta esperada na análise do sinal vibratório obtido do conjunto da bancada.

- **Frequência de engrenamento.** A frequência de engrenamento pode ser calculada a partir do produto do número de dentes pela velocidade de rotação [20,21].

$$F_e = \omega_p N_p = \omega_c N_c$$

Onde N_p é o número de dentes do peão que aqui trata-se da engrenagem planetária.

- **Frequência da malha.**

$$F_e = N_p \frac{\text{rotação do motor}}{60}$$

- **Defeito das gaiolas do rolamento.** Este componente danificado apresenta frequência dos elementos rolantes podem depender de vários fatores, incluindo o tipo de gaiola usada, o material da gaiola, as condições de operação, a carga aplicada e outros fatores [7].
- **Folga excessivas.** Para caso exista instabilidade no rolamento do pinhão ou mesmo uma rotação com folga em rolamentos ou eixo origina frequência dada por.

$$F_r = 0,43 \cong 0,47 \times fp$$

Onde fp é a frequência que corresponde à engrenagem planetária.

- **Excentricidades.** Estas surgem por irregularidades e imperfeições nos eixos, podem ser originadas ou atribuídas a um contato inadequado entre os dentes [21] (p. 450 - 460).

$$f_1 = F_e + fp$$

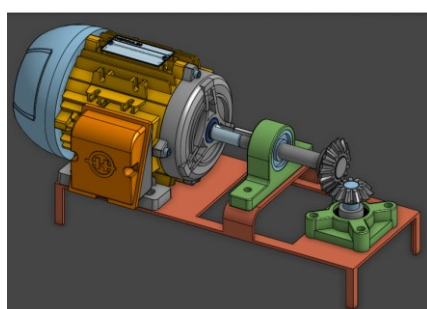
$$f_2 = F_e - fp$$

Assim como as engrenagens o material em aço (cantoneiras e chapas metálicas) adquirido para a produção da bancada de análise foi reaproveitado de matérias sucateados, pelas Tabela 1 observa-se quais materiais utilizados.

Tabela 1. Materiais utilizados na produção da bancada de análise vibratória M1.

MATERIAL	QUANTIDADE	ESPESSURA/DIAMETRO	METRAGEM
CHAPA METALICA	1 uni	3/8''	300mm ²
CANTONEIRAS	2 uni	25x25mm 3/16''	1000mm
ELÉTRODO REVESTIDO 6013	1 kg	2,5mm (Ø)	
TUBOSQUADRADOS	4 uni	25x25mm 2mm	600mm

Para a construção desenvolveu-se um projeto dimensionado e modelado tomando como base o motor trifásico utilizado para imprimir rotação, o eixo acoplado a engrenagem, os mancais permitindo atingir o RPM e frequências adequadas para obtenção do sinal através do acelerômetro. No projeto foram definidos alguns aspectos tomando como posicionamento dos mancais e altura para engrenamento do par, foi desenvolvido com auxílio dos softwares Autocad, CAD Onshape E SolidWorks Simulation.



(a)



(b)

Fonte: Autoria própria (2023).

Figura 2 - a) Demonstração a modelagem da bancada com todos elementos mecânicos que foram utilizados no projeto eixos, mancais, rolamentos, engrenagens, chaveta e motor. (b) A bancada pronta para operação.

Com base na modelagem 3D foram estipuladas as medidas permitindo um ensaio de testes de hipóteses de forma calculada, portanto, foi possível criar a bancada suprimindo a necessidade de dimensões posicionamento dos mancais, eixos e encaixe entre os dentes das engrenagens. As dimensões para o processo de fabricação seguem como base os valores estipulados no software as medidas foram criadas em um ambiente computadorizado, mais próximo possível do modelo real.

Foi feito o uso de dois mancais para fixação dos eixos, um mancal do tipo apoio P204 – POWELL com rolamento UC204 (R. UC204=UCP 204) e um mancal do tipo flange F204 – MITSU. [13]

Os componentes de transmissão de potência (o eixo) deste projeto desempenham papel fundamental na transmissão do torque [14] proveniente do motor trifásico kW 1,1(1.5) (CV), RPM 3420/60Hz para engrenagem planetária no conjunto em estudo. O sistema que admite o par engrenado na pesquisa é composto por dois eixos, chamados aqui de eixo P1 e eixo S1. O eixo P1 principal será acoplado partindo da ponta do eixo do motor por uma luva de material flexível com braçadeiras de aço suas extremidades, conta ainda com diversas estrias usinadas no próprio eixo formado por diversas ranhuras devidamente espaçadas para fixação

da engrenagem. As estrias usinadas realizam torque pelo eixo decorrendo de uma forma mais distribuída em sua seção transversal fracionando a aplicação da força [14]. O eixo S1 contou com uma usinagem para atender o diâmetro interno (19,36mm) da engrenagem satélite, e com auxílio do sistema de ajustes eixo-base pela NBR 6158 para determinar a fixação por ajuste [15]. Fez-se a a medição das excentricidade dos eixos com uso relógio comparador e micrômetro, P1 apresentou 0,02mm e o eixo S1 com 0,11mm.

Os eixos foram usinados a partir de tarugos de aço 1020 obtidos, nos laboratórios de usinagem da UFERSA – Universidade Federal Rural do Semi-árido, adotou-se neste projeto, as padronizações da ABNT, ANSI, DIN e ISO. Através da Tabela 2 observa-se a composição do aço utilizado normatizado pela ABNT NBR NM 87:2000 com dureza média de 143 HB [16].

Tabela 2. Composição de corrida (%) química do aço carbono 1020.

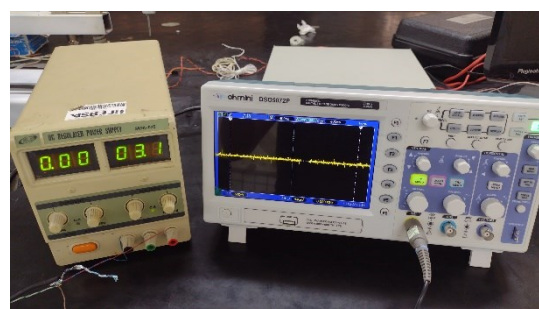
Elemento	Carbono (C)	Manganês (Mn)	Fósforo (P) máx.	Enxofre (S)máx.
(%)	0,18 – 0,23	0,30 – 0,60	0,040	0,050

Os sinais experimentais foram analisados utilizando o ANALISADOR DE VIBRAÇÃO VIB 100/200 Series, útil para a detecção precoce de falhas incipientes em máquinas rotativas, este faz uso do software SIGPRED que é o software de pós-processamento, que permite a análise, criação de rotas, gerenciamento e bando de dados das análises de vibrações coletadas de modo a transferir os dados coletados em campo para um melhor gerenciamento de todo o processo de inspeção [17] permitindo integrar e transferir as configurações dos pontos de vibrações, sensitiva e outros.

Foi utilizado também um acelerômetro nas para medição das frequências de baixa, essas determinam fatores importantes na análise vibracional. Os dados foram captados com um equipamento montando osciloscópio com uma faixa de 400ms e uma fonte em 5V, assim foram obtidos os dados em uma faixa adequada para observação das frequências de engrenamento e as frequências referente aos defeitos de desalinhamento, variações de torque, vibração livre da bancada (por não estar fixada), superposição de dentes. O tratamento dos dados foi realizado com o software MATLAB.



(a)



(b)

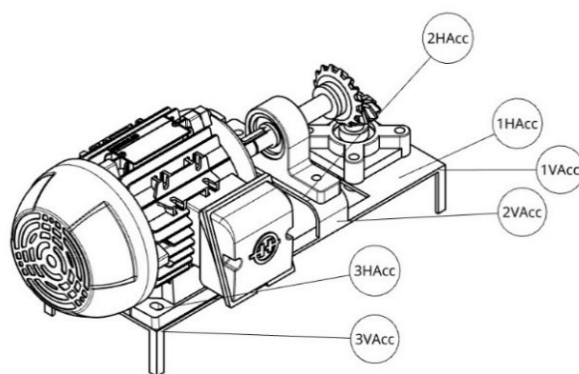
Fonte: Autoria própria (2023).

Figura 3. a) Equipamento utilizado para medição ANALISADOR DE VIBRAÇÃO VIB 100/200 Series. b) Osciloscópio usado na extração dos dados gráficos.

3. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL.

Após montagem da bancada M1 foram realizados os testes para obtenção dos gráficos demonstrativos dos defeitos que deu sequência à uma análise de vibração para o monitoramento da condição de peças rotativas da máquina. A avaliação das vibrações registradas é realizada de através do ANALISADOR DE VIBRAÇÃO VIB 100/200. O comportamento da vibração foi analisado com maior precisão em relação à aplicação pretendida, além disso é importante colocar o ponto de medição o mais próximo possível da causa da falta para aumentar a confiabilidade bem como minimizar os efeitos das vibrações externas como excentricidades, ajustes com folgas nivelamento e alinhamento do conjunto [18].

Inicialmente foi realizada uma medição no estado inicial onde foi analisado o conjunto do engrenamento ligado ao motor rotacionando a 600 rpm/ 10Hz [18], as obtenções de dados foram realizadas com auxílio do software SIGPRED (Sistema Integrado de manutenção Preditiva) onde foram criadas rotas de análise vibracionais definindo os pontos de coleta de dados que posteriormente foram feitos pelo ANALISADOR DE VIBRAÇÕES. O software solicita que se determine alguns fatores de entrada para definir ponto a ponto, por tanto, todos foram tomadas como medidas do estudo os principais parâmetros: o tipo do sinal como FFT/TIME, parâmetro de medição aceleração (Acc), frequência corte no espectro de 2Hz, frequência de corte de alta correspondendo a 1000 (ISO) e características dos tipos de deslizamento utilizado (rolamento). Com os procedimentos de diagnósticos definidos montou-se então um banco com os dados pontuais em quais o acelerômetro do acoplado subdivididos por 3 medições e coleta de dados horizontal e vertical representadas na Figura 7, seus dados gráficos foram inicialmente no estado que fora adquirida, com monitoramento gráfico e as imagens captadas.



Fonte: Autoria própria (2023).

Figura 4 – Pontos de medição onde o acelerômetro foi fixado.

Na tabela 3 observar o descritivo do critério de escolhas dos pontos para obtenção dos dados utilizando a norma BS ISO 20816-1 2016 [19].

Tabela 3. Relação dos pontos da bancada com os pontos estabelecidos na norma.

PONTOS (Acc)	1H	2H	3H	1V	2V	3V
MEDIÇÕES	Pontos de medição para motores alternativos próximos aos locais dos rolamentos (horizontal)	Pontos de medição para rolamentos tipo mancal (vertical)	Pontos de medição para máquinas elétricas (horizontal)	Pontos de medição para motores alternativos próximos aos locais dos rolamentos (vertical)	Pontos de medição para rolamentos tipo mancal (vertical)	Pontos de medição para máquinas elétricas (vertical)

	1H	1V	2H	2V	3H	3V
MED1	0,841	1,27	1,435	1,837	0,485	0,522
MED2	0,798	0,809	1,366	0,846	0,9	0,43
MED3	1,278	0,848	1,045	0,865	0,855	0,666

Fonte: Autoria própria (2023).

Figura 5 – Pontos medidos com equipamento nos distintos pontos enumerados na figura 4.

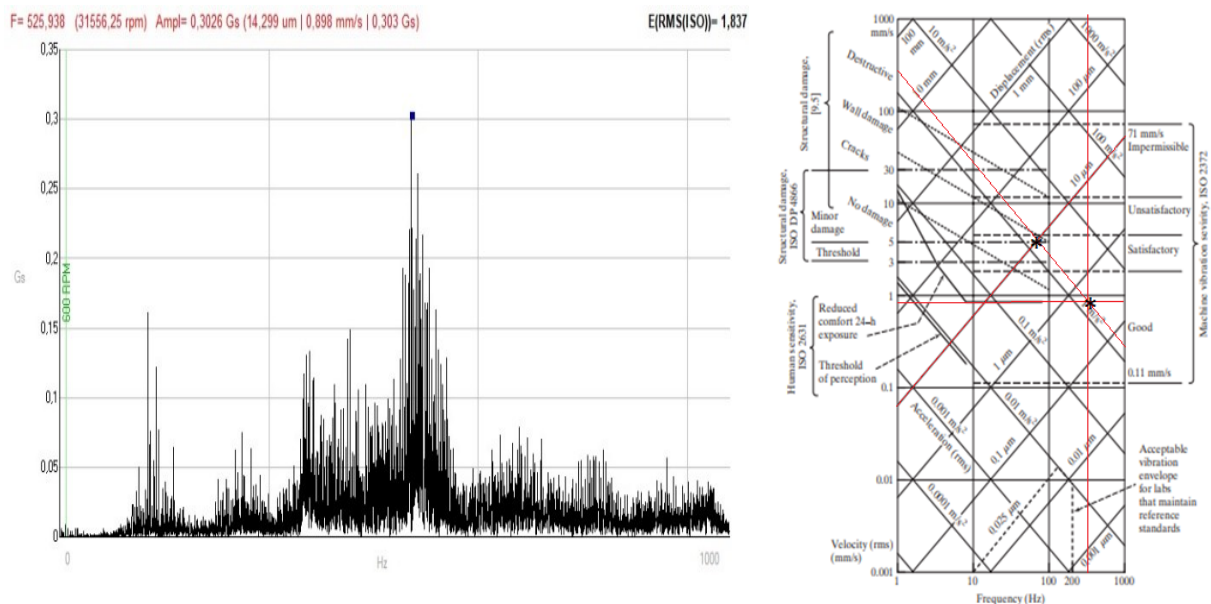
As próximas análises foram realizadas usando um acelerômetro acoplado a superfícies de apoio do mancal radial tomando o mesmo ponto 2H horizontal que foi o um dos mais crítico analisando anteriormente fluando menos as variações das medições 1,2,3. Uma vez conectado ao osciloscópio podemos captar as frequências de baixa medindo-as e observando quais destas correspondem aos métodos de cálculos, ao extrair os dados do osciloscópio estes veem em frações menores de relação Tempo e amplitude, entretanto, para observamos com maior eficácia os tratos em sua FFT nos dando gráficos onde as frequências aparecem. Utilizamos no software para essa conversão o fato RMS dado por:

$$Rm_s = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i^2)}$$

Assim poderemos observar com melhor exatidão as flutuações gráficas oriundas dos defeitos existentes.

4. RESULTADOS.

Após o monitoramento do dados percebeu-se que sinais de amostragem gráfica indicam o desenvolvimento de uma falha para a condição inicial de dano é perceptível como demonstrado na Figura 6 um padrão de irregularidades no contato entre os dentes, entretanto, este contato ainda atende os critérios da norma BS ISO 20816-1 2016 [19], que por sua vez mostra os parâmetros de análise em um gráfico modulado para caracterizar as severidades das vibrações em máquinas rotativas como o deslocamento vibratório medido em micrômetros, velocidade de vibração medida em milímetros por segundo, aceleração vibratória medida em metros por segundo quadrado[1](p. 305-306). Assim, as análises das medições de diversos pontos das máquinas apresentaram um critério entre a condição considerada “Boa” e a “Satisfatória”. Observa-se que foram obtidos para 10Hz de frequência de engrenamento do sistema em investigação 0,898 mm/s, 0,303m/s² e 14,299µm.



(a)

Fonte: Autoria própria (2023).

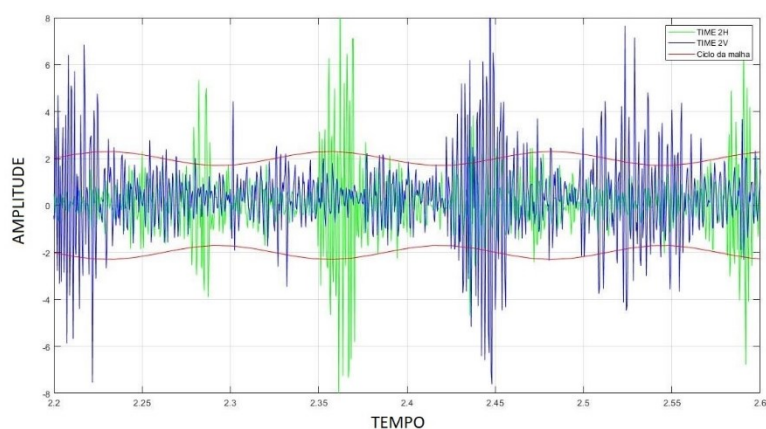
(b)

Fonte: Fonte: RAO 4ªEd., pag 305.

Figura 6 – (a) Frequência de engrenamento obtida com osciloscópio Frequência (Hz) em relação a (Gs). (a) Condição de rotatividade baseada nos dados observados.

O demonstrativo destes gráficos da Figura 7 gera um perfil de manutenção preditiva, pois, ausência de um padrão claro na frequência de engrenamento dos dentes mostra que há divergência entre alguns pontos medidos devido a um pequeno desalinhamento radial em amplitude minimamente discrepante. Evidencia-se ainda a importância da proximidade do acelerômetro do conjunto engrenado para melhor precisão pois obteve-se amplitude com maiores valores de medição nesses pontos.

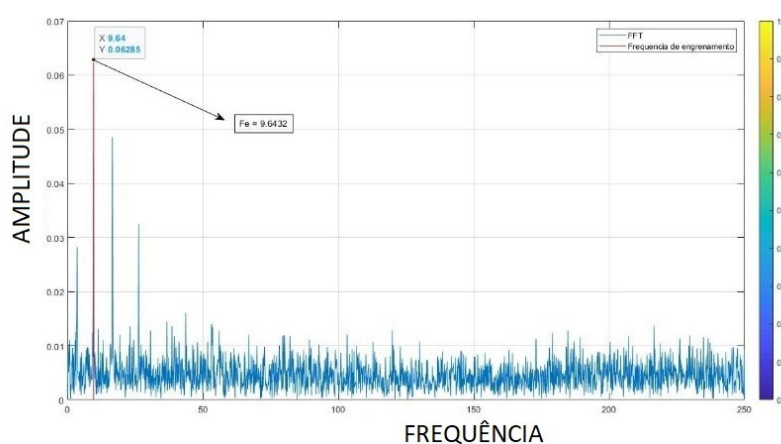
Observa-se que há uma um erro de passo caracterizada pela variação aparente da rotação da engrenagem excêntrica mostrando uma amplitude de onda em relação ao tempo com períodos repetidos de irregular, bem como o barulho característico dos dentes tocando-se ao passar pelos pontos onde há oscilação da deflexão devido a força centrífuga [21] bem como a observação visual ao iniciar a rotação dos eixos.



Fonte: Autoria própria (2023).

Figura 7 - Comparativo entre as curvas tiradas entre os pontos 2H em azul e 2V em verde.

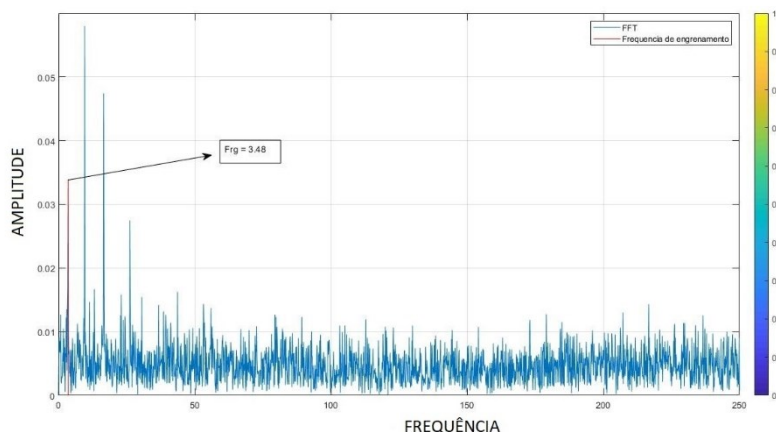
Ao analisar os dados obtidos destes gráficos observou-se que as frequências de baixa quase imperceptíveis no equipamento industrial, extraindo assim poucas informações precisas em estudo de âmbito laboratorial, entretanto, o acelerômetro conectado ao osciloscópio nos mostrou algumas observações coerentes e ou próximas das frequências estabelecidas pelos cálculos realizados pelo software MATLAB. Bem como a frequência de engrenamento, que estabelecida em projeto e aplicada o inversor de frequência foi de 10Hz, observou-se nos dados que fora apresentada em 9,6432Hz.



Fonte: Autoria própria (2023).

Figura 8 – Frequência de engrenamento obtida com osciloscópio.

Identifica-se também na Figura 9 as frequências de falha na gaiola que se apresenta pelos defeitos do rolamento utilizado que comporta a engrenagem planetária, o rolamento UC-204 da SKF apresenta uma frequência da falha da gaiola de 3,815Hz [22] bem próximo do encontrado, nas medições que foi de 3,42Hz.



Fonte: Autoria própria (2023).

Figura 9 – Frequência de falha da gaiola do rolamento obtida com osciloscópio.

Observa-se excentricidades no pião próximos calculadas, com uma pequena variação proveniente da própria vibração existente na bancada que não é fixada em nenhuma superfície, no entrando, consegue observar picos $f_1 = 154,2912\text{Hz}$, $f_1 = 135,0048\text{Hz}$ faixa correspondente a excentricidade [21].

$$f_1 = F_e + fp$$

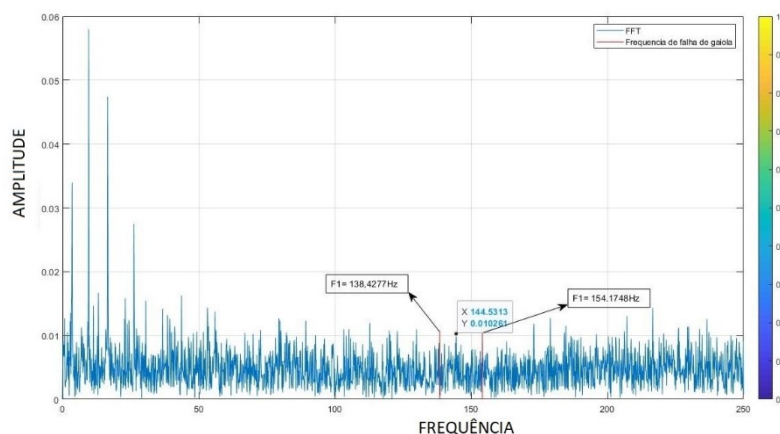
$$f_1 = 144,6480 + 9,6432$$

$$f_1 = 154,2912\text{Hz}$$

$$f_2 = F_e - fp$$

$$f_2 = 144,6480 - 9,6432$$

$$f_1 = 135,0048\text{Hz}$$



Fonte: Autoria própria (2023).

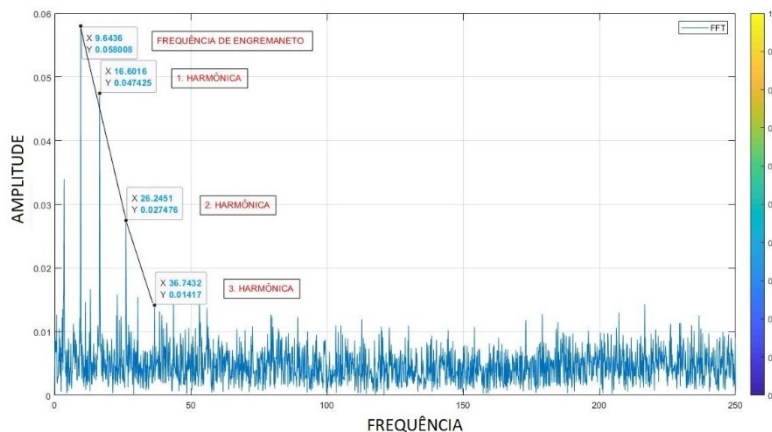
Figura 10 – Frequência de falha por excentricidade obtida com osciloscópio.

Mesmo em estado de ótima conservação aparente as engrenagens ainda sim, apresentam folgas e micro defeitos em alguns dentes originando uma devido ao escorregamento entre eles, captados nas amostragens

estes defeitos provoca diminuição das raiais verticais de amplitude, logo, ao observamos as harmônicas decrescem em amplitude caracterizando um defeito de desgaste [20,21].

$$F_m = 2F_e, 2F_e, 4F_e$$

$$F_m = 2(9.6432) = 19.2864\text{Hz}; F_m = 3(9.6432) = 28,9296\text{Hz}; F_m = 4(9.6432) = 38,5728\text{Hz}$$



Fonte: Autoria própria (2023).

Figura 11 – Frequência de falha por desgaste.

5. CONCLUSÃO.

Conclui-se que o processamento e a interpretação dos dados adquiridos permitem previsões que geram a base para manutenção preditiva confirmando que conjuntos em máquinas rotativas, os problemas gerais são perceptíveis nas análises de vibrações, mostrando as falhas nas usinagens dos eixos gerando excentricidades apresentando uma frequência defeituosa de 135Hz à 154Hz, folga no contato entre os dentes das engrenagens variando a amplitude gráfica entre 2,2 Gs à 1,8 Gs., também na utilização de rolamentos com frequência identificada de falha nas gaiolas de 3.48Hz.

Observa-se que o há um desvio das medidas calculadas com as medidas observadas graficamente como a frequência de entrada 10Hz calculada e observada 9,6432Hz, evidenciando uma inexatidão proveniente de vibrações externas do nivelamento da bancada com um base não fixada, as médias dos dados obtidos e falta de uso de tacômetro deixando imprecisa as RPM dos eixos.

É, portanto, evidente a importância econômica de fornecer informações importantes para identificação de defeitos nesses elementos e realizar manutenções preditivas, um perfeito funcionamento das máquinas leva automaticamente a uma melhoria da qualidade da vida útil destes componentes outros benefícios incluem vida útil.

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS.

Como sugestão de projeto futuro, eliminar os principais defeitos listados no estudo isolando as vibrações já existentes e realizar, então, a observar vibração advinda do contato dente a dente das engrenagens e posteriormente implantar defeitos até sua falha crítica ou não, observando graficamente como se comporta.

7. REFERÊNCIAS.

- [1] RAO, S. S. Vibrações Mecânicas. Revisor Técnico José Juliano de Lima Júnior; Tradução Arlete Simille. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2009. 404 p.
- [2] SILVA, Tiago Avelino Flávio; NASCIMENTO, Guilherme Markezan. IMPORTÂNCIA DA MANUTENÇÃO PREDITIVA POR ANÁLISE DE VIBRAÇÃO NUM CONJUNTO MOTOR E

- BOMBA APLICADO (UM ESTUDO DE CASO). Anais do SIMPÓSIO NACIONAL DE CIÊNCIAS E ENGENHARIAS (SINACEN), v. 5, n. 2, p. 112-131, 2020
- [3] SILVA IRMÃO, Marcos Antonio da et al. Comparação de representações conjuntas tempo-frequência aplicadas na análise de falhas em sistemas engrenados. 2002.
- [4] SILVA, Antonio Almeida; IRMÃO, Marcos Antônio Da Silva; PADOVESE, Linilson Rodrigues. Otimização de representações tempo-frequência na análise de falhas em sistemas engrenados. Revista Iberoamericana de Ingeniería Mecánica, v. 10, n. 2, p. 35, 2006.
- [5] MARK, William D. Analysis of the vibratory excitation of gear systems: basic theory. The Journal of the Acoustical Society of America, v. 63, n. 5, p. 1409-1430, 1978.
- [6] Goyal D, Saini A, Dharmi SS, Pabla BS. Intelligent predictive maintenance of dynamic systems using condition monitoring and signal processing techniques a review. In: 2016 International Conference on Advances in Computing, Communication, & Automation. IEEE; 2016, p. 1–6.
- [7] APOSTILA SKF. Disponível online: <http://www.skf.com.br> (acesso em 25/07/2023).
- [8] DA SILVA, Demian Gomes; JÚNIOR, Adyles Arato. ANÁLISE POR DEMODULAÇÃO APLICADA AO MONITORAMENTO DE FALHAS EM ENGRENAGENS.
- [9] ELASHA, Faris et al. Pitting detection in worm gearboxes with vibration analysis. Engineering Failure Analysis, v. 42, p. 366-376, 2014.
- [10] TOSSI, Thales Camesi. Detecção de falhas em sistemas de transmissão de potência por correias trapezoidais por meio de análise do sinal vibratório. 2017.
- [11] José Sotelo Jr.; Luis Novais Ferreira França. Introdução às vibrações mecânicas. 1ª edição. São Paulo: Blucher, 2006.
- [12] GOMES, Ramon Brunow. Análise macroscópica e microscópica de tensões de contato em engrenagens. 2019. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Mecânica) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2019.
- [13] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBRISO 15242-1: Mancais de rolamentos - Métodos de medição da vibração - Parte 1: Fundamentos. p. 3-13. 2010.
- [14] LIMA, Vinícius Arthur; RAULINO, Wesley Andrade. Projeto de uma bancada para teste em eixos estriados. 2015.
- [15] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6158: Sistema de tolerâncias e ajustes. Rio de Janeiro. 1995.
- [16] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR NM 87:2000: Aço carbono e ligados para construção mecânica Designação e composição química. Rio de Janeiro, p. 4-15. 2004.
- [17] HOT TEC. Disponível online: <http://www.hottec.com.br> (acesso em 25/08/2023).
- [18] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 10082:2021: Ensaio não destrutivo — Análise de vibrações — Avaliação da vibração mecânica de máquinas com velocidades de operação de 600 r/min a 5 000 r/min. Rio de Janeiro, p. 12. 2021.
- [19] British Standard, ISO 20816-1. Mechanical Vibration –Measurement and evaluation of machine vibration – Part 1: General guidelines. 2016. p 27-90.
- [20] Análise de vibrações em engrenagens. Disponível online: <https://www.dmc.pt/analise-de-vibracoes-em-engrenagens>. (acesso em 4/10/2023).
- [21] Nepomuceno, Lauro Xavier. Técnicas de Manutenção Preditiva, Vol. 1. São Paulo: Editora Blucher, 1989. 450 – 470 p.
- [22] SKF Bearing Select. Disponível online: <https://www.skfbearingsselect.com/#/size-lubrication/single-bearing>. (acesso em 06/10/2023).