

**UNIVERSIDADE FEDERAL DA GRANDE DOURADOS**  
**FACULDADE DE ENGENHARIA - FAEN**  
**ENGENHARIA MECÂNICA**

FABRICIO JUNIOR DA SILVA

**MANUTENÇÃO PREDITIVA POR ANÁLISE DE VIBRAÇÃO COM  
UTILIZAÇÃO DE MICROCONTROLADOR ARDUINO E SENSOR  
MEMS: ESTUDO DE CASO DE UM CONJUNTO MOTO-BOMBA**

**DOURADOS**

**2022**

FABRICIO JUNIOR DA SILVA

**MANUTENÇÃO PREDITIVA POR ANÁLISE DE VIBRAÇÃO COM  
UTILIZAÇÃO DE MICROCONTROLADOR ARDUINO E SENSOR  
MEMS: ESTUDO DE CASO DE UM CONJUNTO MOTO-BOMBA**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado a Faculdade de Engenharia da Universidade Federal da Grande Dourados, como parte dos requisitos para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Dr. Rodrigo Borges Santos

Área de Concentração: Mecânica dos sólidos

**DOURADOS**

**2022**



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO  
FUNDAÇÃO UNIVERSIDADE FEDERAL DA GRANDE DOURADOS

## ANEXO D - AVALIAÇÃO FINAL DO TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

Aluno: **FABRICIO JUNIOR DA SILVA**

Título do trabalho e subtítulo (se houver): **MANUTENÇÃO PREDITIVA POR ANÁLISE DE VIBRAÇÃO COM UTILIZAÇÃO DE MICROCONTROLADOR ARDUINO E SENSOR MEMS: ESTUDO DE CASO DE UM CONJUNTO MOTO-BOMBA**

### BANCA EXAMINADORA

**1. Presidente (orientador):**

Prof. Dr. RODRIGO BORGES SANTOS, Universidade Federal da Grande Dourados - UFGD

**2. Membro:**

Prof. Dr. DOUGLAS DOMINGUES BUENO, Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho – FEIS/UNESP

**3. Membro:**

Prof. Dr. LEANDRO DE SOUZA LEÃO, Universidade Federal de São João Del Rei - UFSJ

De acordo com o grau final obtido pelo aluno, nós da banca examinadora, declaramos **APROVADO** o aluno acima identificado, na componente curricular Trabalho de Conclusão de Curso (TCC-II) de Graduação no Curso de Engenharia Mecânica da Universidade Federal da Grande Dourados.

Dourados, 28 de junho de 2022.

Prof. Dr. Rodrigo Borges Santos

Prof. Dr. Douglas Domingues Bueno

Documento assinado digitalmente  
LEANDRO DE SOUZA LEAO  
Data: 28/06/2022 21:39:36-0300  
Verifique em <https://verificador.iti.br>

Prof. Dr. Leandro de Souza Leão

## RESUMO

Este trabalho apresenta o desenvolvimento de um sistema de baixo custo de aquisição de sinais utilizando microcontrolador arduino (ATmega328) e Sensor MEMS (MPU6050) para medir vibrações mecânicas em um conjunto moto-bomba da Usina Monte Verde. O diagnóstico do conjunto mecânico após análise espectral e dos níveis de vibração RMS conforme NBR 10082 e ISO 10816-3. Foi identificado que o conjunto mecânico possui desalinhamento severo como principal defeito. Foi realizada intervenção no equipamento, mas ainda assim, o desalinhamento persiste, pois não é possível realizar o alinhamento de eixos de forma adequada, devido à problema estruturais da base do equipamento. Sendo assim, é preciso programar modificação da base do motor a fim de possibilitar alinhamento correto do conjunto.

**Palavras-chave:** Manutenção preditiva, Microcontrolador Arduino, MEMS, Espectro de frequência.

## ABSTRACT

This work presents the development of a low cost signal acquisition system using Arduino microcontroller (ATmega328) and MEMS Sensor (MPU6050) to measure mechanical vibrations in a motor-pump set at the Monteverde Plant. The diagnosis of the mechanical assembly after spectral analysis and RMS vibration levels according to NBR 10082 and ISO 10816-3. It was identified that the mechanical assembly has severe misalignment as the main defect. An intervention was carried out on the equipment, but even so, the misalignment persists, as it is not possible to perform the alignment of axes properly, due to the structural problem of the base of the equipment. Therefore, it is necessary to program a modification of the motor base in order to allow correct alignment of the set.

**Keywords:** Predictive maintenance, Arduino microcontroller, MEMS, Frequency spectrum.

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>3</b>
1.1 OBJETIVOS.....	4
<b>2 METODOLOGIA.....</b>	<b>5</b>
2.1 EQUIPAMENTO, PONTOS DE MEDIÇÃO E PERIODICIDADE .....	5
2.2 AQUISIÇÃO DE SINAIS .....	10
2.2.1 Parâmetros para aquisição de sinais.....	12
2.3 PROCESSAMENTO DE SINAIS .....	13
2.3.1 Transformada Rápida de Fourier - FFT .....	13
2.3.2 Valor Global de Vibração RMS .....	14
2.4 CRITÉRIO DE AVALIAÇÃO DAS VIBRAÇÕES .....	15
2.4.1 NBR 10082 .....	15
2.4.2 ISO 10816-3.....	16
<b>3 RESULTADOS E DISCUSSÕES .....</b>	<b>18</b>
3.1 PRIMEIRA MEDIÇÃO DE VIBRAÇÃO.....	18
3.1.1 Bomba Lado Acoplado.....	19
3.1.2 Bomba Lado Oposto .....	21
3.1.3 Motor Lado Acoplado.....	24
3.1.4 Motor Lado Oposto .....	26
3.2 MANUTENÇÃO NO CONJUNTO MECÂNICO .....	27
3.3 MEDIÇÃO DE VIBRAÇÃO APÓS INTERVENÇÃO .....	28
3.4 SÍNTESE DA ANÁLISE VIBRATÓRIA.....	30
<b>4 CONCLUSÕES .....</b>	<b>31</b>
<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>32</b>
<b>ANEXO A – DATASHEET BOMBA IMBIL BMI 250-580 .....</b>	<b>34</b>
<b>ANEXO B – RELATÓRIO TÉCNICO DE ANÁLISE DE VIBRAÇÃO .....</b>	<b>35</b>
<b>APÊNDICE A – PROGRAMAÇÃO ARDUINO .....</b>	<b>36</b>
<b>APÊNDICE B – TABELA DE DEFEITOS E ESPECTROS.....</b>	<b>39</b>

## 1 INTRODUÇÃO

A manutenção preditiva tem como objetivo prevenir falhas nos equipamentos através da aplicação de técnicas que permitem a operação contínua do equipamento pelo maior tempo possível evitando-se assim falhas inesperadas e consequente aumento de custo da manutenção e perdas de produção. A manutenção preditiva privilegia a disponibilidade à medida que não promove a intervenção nos equipamentos ou sistemas, pois as técnicas são aplicadas com o equipamento em operação (ENGEFAZ, 2021). Atualmente existem diversas técnicas de manutenção preditiva. São exemplos: análise de óleo, análise de vibração, ultrassom e análise termográfica, entre outras. A análise de vibração será a técnica abordada no presente trabalho.

Segundo Menezes (2015), o método de manutenção preditiva por análise de vibração mecânica toma como conhecimento o estado da máquina através de coletas periódicas e contínuas dos níveis de vibração de um ou mais parâmetros significativos, como deslocamento, velocidade e aceleração. A coleta de dados pode ser realizada via coletores de vibração, ou via sensores fixados nos equipamentos a serem monitorados, de modo a detectar alterações nos níveis de vibração.

Através da monitoração dos parâmetros de vibração é possível detectar prematuramente os defeitos e assim manter a saúde dinâmica dos equipamentos, de modo a inibir a evolução de não conformidades, evitando paradas não programadas para manutenção (GALLI, 2017).

A análise de vibração possibilita identificar os desvios dos níveis de vibrações normalizados de acordo a com especificação técnica do equipamento. Cada componente do equipamento, em funcionamento, vibra de forma diferente, gerando amplitudes e frequências que são possíveis de serem identificadas no espectro de vibração. Se houver alguma anormalidade, o padrão se alterará, possibilitando que identifique o tipo de defeito. Como por exemplo, se o problema pode ser devido ao desbalanceamento do rotor, desalinhamento entre eixos, falhas de lubrificação ou possíveis demais danos nos rolamentos (ENGETELEZ, 2021).

## 1.1 OBJETIVOS

Dos objetivos gerais, o presente trabalho tem como intuito aplicar a manutenção preditiva por análise de vibração para monitoramento de um conjunto moto-bomba da Usina Monteverde, unidade da BP Bunge Bioenergia, empresa atuante no setor sucroalcooleiro, localizada em Ponta Porã – MS.

Dos objetivos específicos, com a finalidade de atender os objetivos gerais pretende-se:

1. Definição das máquinas a serem monitoradas;
2. Definição dos pontos de medição e periodicidade de medição;
3. Aquisição de sinais;
4. Processamento de sinais;
5. Diagnóstico das máquinas de acordo com as normas NBR 10082 e ISO 10816-3.

## 2 METODOLOGIA

Neste capítulo será abordado toda a metodologia utilizada para o desenvolvimento do presente trabalho. Será tratado temas como, definição dos equipamentos a serem monitorados, bem como seus respectivos pontos de medição e periodicidade; como dar-se-á a aquisição e o processamento de sinais; e por fim, os critérios de avaliação de acordo com a norma vigente empregada em análise de vibrações.

### 2.1 EQUIPAMENTO, PONTOS DE MEDIÇÃO E PERIODICIDADE

Os equipamentos a serem monitorados no presente trabalho referem-se a uma bomba centrífuga da Imbil, modelo BMI 250-580, utilizada para bombeamento de flegmaça, subproduto da Destilaria, para realizar assepsia dos trocadores de calor e Dornas de Fermentação da fábrica de álcool, acionada por um motor de indução trifásico da Weg, modelo 315S/M, do tipo *squirrel cage* (Figuras 2.1 e 2.2). Os equipamentos pertencem a Usina Monteverde, unidade da BP Bunge Bioenergia, empresa atuante no setor sucroalcooleiro, localizada em Ponta Porã - MS. Vale ressaltar que todos os dados obtidos para elaboração desse trabalho foram autorizados pelo gestor do setor, assim como estão de acordo com as diretrizes da empresa.

A escolha do conjunto mecânico é levada em consideração sua criticidade, isto é, sua importância dentro da planta industrial. Bem como a possibilidade de realizar medições de forma periódica.

Os principais dados técnicos sobre o conjunto mecânico estão disponíveis nas Tabelas 2.1 e 2.2. Demais dados estão disponíveis para consulta no Anexo A.

**Tabela 2.1 – Dados técnicos do Motor Elétrico (WEG 315S/M). Sendo, LA – Lado Acoplado e LOA – Lado Oposto Acoplado.**

Potência	Rotação	Tensão de Alimentação	Corrente Elétrica	Frequência de Rede	Rolamentos
92 kW	880 rpm	440 V	159 A	60 Hz	LA: ESF SKF 6319 LOA: ESF SKF 6316

Fonte: Autoria própria.

**Tabela 2.2 – Dados técnicos da Bomba Centrífuga (IMBIL BMI 250-580).**

<b>Diâmetro rotor</b>	<b>Vazão</b>	<b>Pressão Recalque</b>	<b>Rolamentos</b>
550 mm	800 m <sup>3</sup> /h	30 mca	LA: ESF SKF 7222BG LOA: ESF SKF 6222

Fonte: Autoria própria.

**Figura 2.1 – Conjunto mecânico moto-bomba.**



Fonte: Autoria própria.

**Figura 2.2 – Local de instalação do conjunto moto-bomba.**



Fonte: Autoria própria.

Os pontos de medição escolhido para se realizar as coletas de dados deve ser na própria estrutura do equipamento e o mais próximo possível dos mancais de rolamento (SKF, 2004). Atentando-se quanto a rigidez do ponto de medição da estrutura, pois parte flexíveis da máquina podem conduzir a medidas errôneas.

O plano horizontal de medição é o mais importante, pois é nessa direção que a máquina apresenta os maiores níveis de vibração, pois as máquinas, no geral, são mais flexíveis no plano horizontal. Em contrapartida, medições no plano vertical usualmente apresentam menos vibração em relação ao horizontal, pela rigidez de montagem e ação gravitacional. Já as medições axiais são as que apresentam menores níveis de vibração sob condições ideais pela maioria das forças geradas serem perpendiculares ao eixo (GALLI, 2017).

As medições são efetuadas em 2 pontos para cada equipamento (motor e bomba), totalizando 4 pontos de medição para o conjunto (1, 2, 3 e 4), sendo 2 no Lado Acoplado – LA, e os outros 2 no Lado Oposto ao Acoplado – LOA, de cada equipamento. A marcação dos pontos é numérica e de forma sequencial (1, 2, 3, 4) e deve seguir o fluxo de transmissão da potência, ou seja, do equipamento de acionamento para o equipamento acionado, conforme mostra a Tabela 2.3.

**Tabela 2.3 – Pontos de medição do conjunto mecânico.**

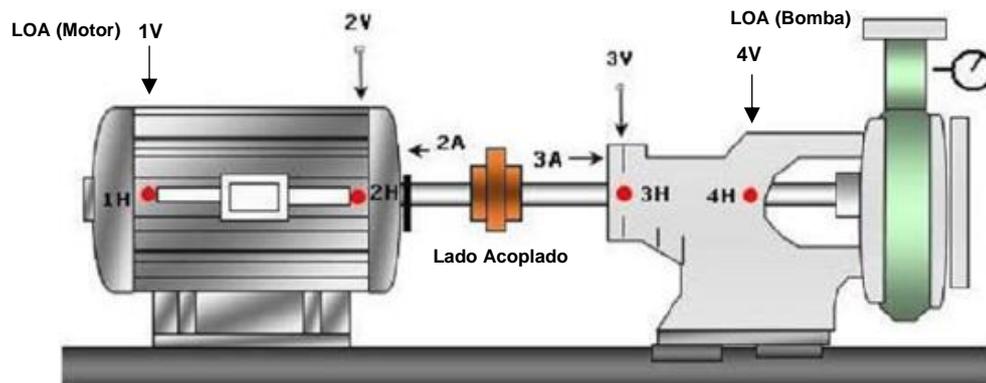
<b>Máquina</b>	<b>Posição</b>	<b>Ponto</b>	<b>Horizontal</b>	<b>Vertical</b>	<b>Axial</b>
Motor	LOA	1	Sim	Não	Não
Motor	LA	2	Sim	Sim	Sim
Bomba	LA	3	Sim	Sim	Sim
Bomba	LOA	4	Sim	Não	Não

**Fonte: Autoria própria.**

A Figura 2.3 apresenta o croqui esquemático com os pontos de coleta. Os símbolos A, V e H indicam as direções Axial, Vertical e Horizontal, respectivamente.

São realizadas duas rodadas de medições, sendo a primeira realizada em 13 de maio de 2022, seguido de uma nova medição, pós-manutenção, em 06 de junho de 2022, a fim de verificar os níveis de vibração, assim como a eficiência da intervenção.

**Figura 2.3 – Croqui esquemático de pontos de coleta do conjunto mecânico.**



Fonte: Adaptado de (Engefaz, 2021).

As Figuras 2.4 e 2.5, demonstram os pontos de coleta no motor, enquanto que as Figuras 2.6 e 2.7, os pontos de coleta na bomba centrífuga.

**Figura 2.4 – Pontos de coleta do Motor elétrico – Lado Oposto: a) Horizontal e b) Vertical.**



Fonte: Autoria própria.

**Figura 2.5 – Pontos de coleta do Motor elétrico - Lado Acoplado: a) Horizontal, b) Vertical e c) Axial.**



c)



Fonte: Autoria própria.

Figura 2.6 – Pontos de coleta da Bomba - Lado Acoplado: a) Horizontal, b) Vertical e c) Axial.

a)



b)



c)



Fonte: Autoria própria.

**Figura 2.7 – Pontos de coleta da Bomba - Lado Oposto Acoplado: a) Horizontal e b) Vertical.**



**Fonte: Autoria própria.**

A Figura 2.8 apresenta o setup experimental utilizado para aquisição de sinais.

**Figura 2.8 – Setup experimental para aquisição de sinais.**



**Fonte: Autoria própria.**

## 2.2 AQUISIÇÃO DE SINAIS

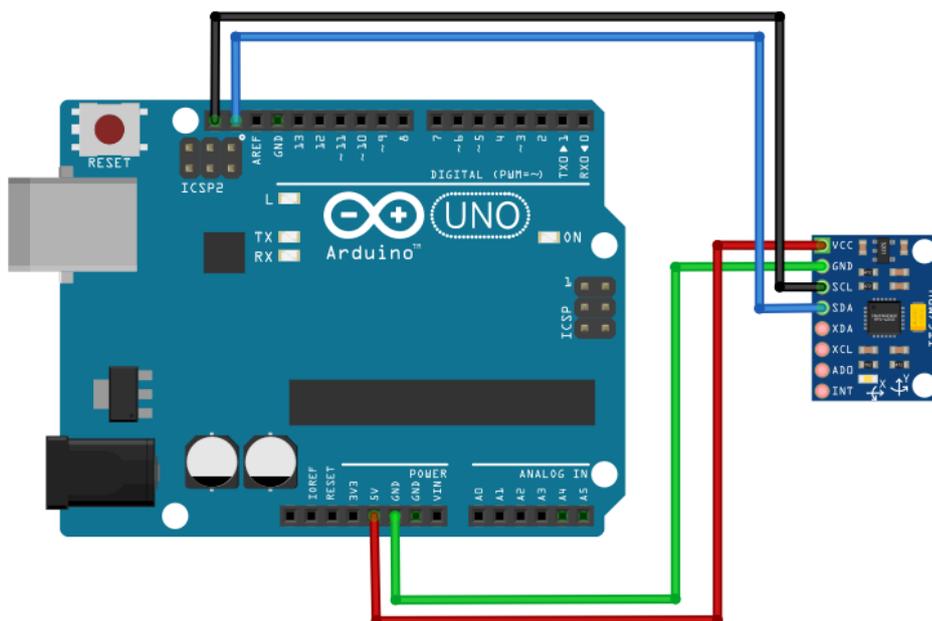
A aquisição dos níveis de vibração é feita através de sensores que convertem a energia mecânica de vibração em sinais elétricos, para ser interpretado pelo instrumento de medição e mostrado ao usuário na forma solicitada. O sensor utilizado neste trabalho é o acelerômetro triaxial MPU6050. O MPU6050 é um dispositivo integrado que combina um giroscópio de 3 eixos, um acelerômetro de 3 eixos e sensor

de temperatura. O acelerômetro possui escalas de  $\pm 2$  g,  $\pm 4$  g,  $\pm 8$  g e  $\pm 16$  g, resolução de 16 bits, com consumo de 500 uA em operações normais, e a comunicação de interface I2C. A temperatura de operação está entre  $-40$  °C a  $85$  °C, com faixas de largura de banda de 5 Hz a 260 Hz, e taxa de aquisição de dados de até 1 kHz (*Datasheet MPU6050*).

A placa Arduino tipo Uno R3 é programável para estabelecer comunicação com o sensor MPU6050, que está fixado na estrutura da máquina, de forma a configurar os parâmetros essenciais para aquisição de sinais. O Arduino Uno R3 é uma placa baseada no microcontrolador ATmega328. Ele tem 14 pinos de entrada/saída digital, 6 entradas analógicas, um cristal oscilador de 16 MHz, e um botão de *reset*, podendo ser alimentado pela conexão USB ou com uma fonte de alimentação externa (*Datasheet Arduino UNO R3*).

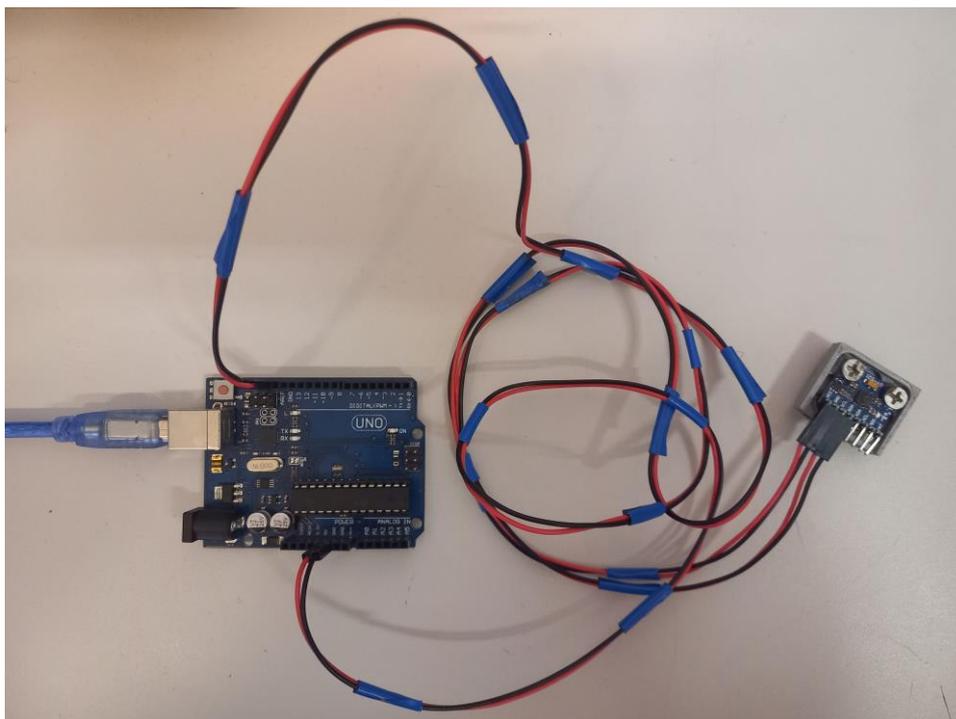
O *Arduino Software* (IDE) de código aberto, foi utilizado para programar a placa Arduino, pois facilita a escrita de código e o *upload* para a placa. As Figuras 2.9 e 2.10 representam o sistema para coleta de dados.

Figura 2.9 – Esquema do sistema para coleta de dados.



Fonte: Autoria própria.

**Figura 2.10 – Protótipo para coleta de dados.**



**Fonte: Autoria própria.**

### 2.2.1 Parâmetros para aquisição de sinais

De acordo com OPPENHEIM (2010), o Teorema de amostragem de Nyquist estabelece que a taxa de amostragem deve ser maior que o dobro da componente de maior frequência que você quer analisar no sinal medido. Levando em consideração que o MPU6050 consegue fazer leituras de frequência de no máximo 260 Hz, uma taxa de amostragem 675 Hz é utilizada para a aquisição de sinais.

Os principais parâmetros para aquisição de sinais são: tempo de coleta de dados de 25 segundos para cada ponto do conjunto mecânico e escala de aceleração de  $\pm 2$  g. Ao final da coleta, têm-se, aproximadamente, 16.875 pontos de medição para cada eixo (x, y e z).

No Apêndice A é apresentada a programação Arduino utilizada para aquisição de sinais vibratórios.

## 2.3 PROCESSAMENTO DE SINAIS

Os sinais, comumente, encontram-se representados por amplitude em função do tempo, ou, amplitude em função da frequência.

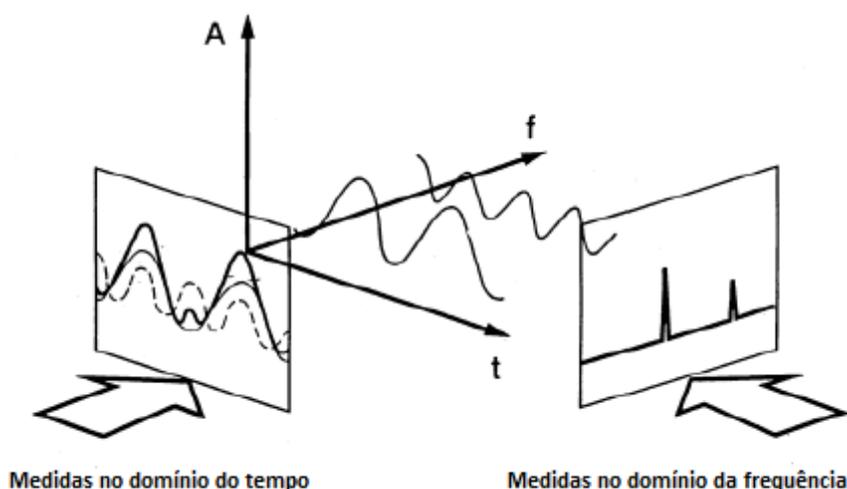
Na prática o que se encontram nos equipamentos industriais são vários componentes vibrando em frequências diferentes, ao mesmo tempo, de modo que estas vibrações se somam e se subtraem formando uma senoide complexa o que dificulta sua interpretação e identificação dos componentes existentes (SKF, 2004).

Para o processamento de sinais será utilizado o *Matlab*, software de computação numérica, para obtenção dos espectros de vibração.

### 2.3.1 Transformada Rápida de Fourier - FFT

Segundo Bandeira (2010), a transformada rápida de Fourier (do inglês “*Fast Fourier Transform*”, ou FFT), é aplicada onde um sinal de vibração periódico complexo é decomposto em suas diferentes componentes senoidais, representadas cada uma delas por sua amplitude e frequência. Utilizando a FFT obtêm-se o espectro em frequência, que é o sinal de vibração exibido no domínio da frequência. A Figura 2.11 mostra a mudança do domínio do tempo para a frequência, onde se visualiza, de ângulos diferente, o mesmo sinal.

Figura 2.11 – Visualização de um sinal no domínio do tempo e da frequência.



Fonte: Adaptado de (Bandeira, 2010).

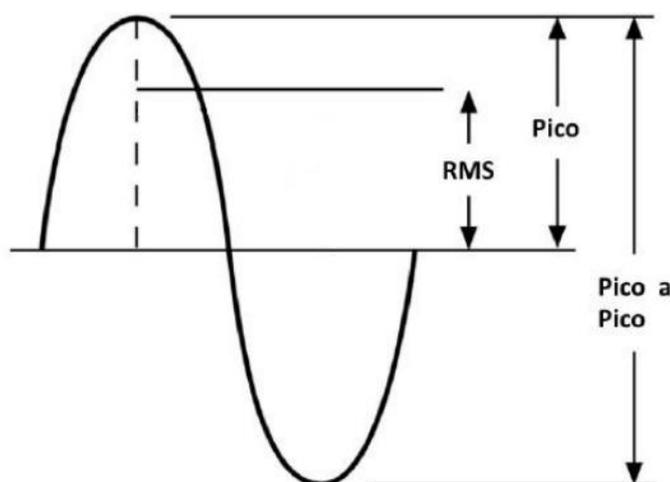
De acordo com Marçal (2005), a frequência aponta a origem da vibração e a amplitude avalia sua gravidade, se normal ou anormal. Neste caso, a análise espectral se faz uma ferramenta essencial, pois cada defeito possui frequências de defeitos característicos, sendo possível identificar defeitos como: desbalanceamento, desalinhamento, deficiência de lubrificação, defeitos de rolamento, entre outros.

### 2.3.2 Valor Global de Vibração RMS

O valor global de vibração é constituído pelo somatório dos níveis de vibração dos diferentes componentes da máquina em funcionamento. A representação do valor global de vibração pode ser dada como: valor de pico, pico-a-pico e RMS (do inglês "*Root Mean Square*"), conforme ilustra a Figura 2.12. O presente trabalho terá como foco o valor RMS.

De acordo com Rocha (2014), o valor RMS representa uma medida do nível de energia do sinal vibratório, ou seja, a medida de energia emitida pela vibração. O valor RMS é capaz de mensurar a severidade da vibração. Esta técnica não localiza o defeito, apenas dá uma indicação que está havendo um aumento de energia no sinal, que pode ser causado pelo desenvolvimento da falha. Essa medição de nível de vibração é a medida mais importante no domínio do tempo, porque leva em consideração o histórico do sinal de vibração no tempo e de um valor de nível, que é relacionado com a energia contida no sinal.

**Figura 2.12 – Representação dos valores globais.**



Fonte: Rocha (2014).

O valor RMS é expresso pela Equação 2.1.

$$RMS = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N |x_n|^2} \quad 2.1$$

Onde  $x$  é a grandeza de vibração a qual deseja medir e  $N$  é tamanho da amostra da grandeza que está sendo medida.

Estes níveis são medidos e comparados com valores tabelados em norma para indicar a severidade da vibração.

## 2.4 CRITÉRIO DE AVALIAÇÃO DAS VIBRAÇÕES

Para avaliar a severidade dos níveis de vibração será utilizado a norma NBR 10082 e ISO 10816-3, que mede o grau de criticidade da vibração através da velocidade RMS, em mm/s.

### 2.4.1 NBR 10082

A norma destina-se para avaliação da vibração mecânica de máquinas com velocidades de operação de 600 RPM a 5000 RPM, com potência acima de 15 kW e frequências de vibração entre 10 Hz e 1000 Hz. As máquinas devem se enquadrar em uma das seguintes classificações:

- Grupo I: máquinas com potência acima de 300 kW;
- Grupo II: máquinas com potência entre 15 kW até 300 kW. Estas máquinas normalmente possuem mancais de rolamentos e possuem rotação acima de 600 r/min.

De acordo com a NBR 10082, o conjunto mecânico, que possui base rígida, potência de 92 kW e rotação de 880 ver/min e se enquadra no Grupo II.

A Tabela 2.4 apresenta a faixa dos níveis de vibração para cada classe de equipamento com valores de velocidade RMS.

**Tabela 2.4 – Classificação de zonas de severidade de vibração para equipamentos classificados como Grupo I e Grupo II.**

Classe do suporte	Limite entre as zonas	Valor eficaz mm/s - RMS	
		Grupo I	Grupo II
Rígido	A/B	1,1	1,8
	B/C	1,8	2,8
	C/D	2,8	4,5
Flexível	A/B	1,8	2,8
	B/C	2,8	4,5
	C/D	4,5	7,1

**Fonte: NBR 10082 (2021).**

A norma NBR 10082 (Tabela 2.5) estabelece critérios de avaliação de acordo com os Valores Eficaz.

Tabela 2.5 – Classificação de zonas de severidade de vibração.

Zona	Descrição
Zona A	Valores de vibração recomendados para máquinas novas ou recentemente comissionadas
Zona B	Valores de vibração aceitáveis para operação contínua para longo período de operação
Zona C	Limite tolerável, valores considerados insatisfatórios. Geralmente, podem continuar operando por um período limitado de tempo
Zona D	Não permissível, possibilidades de danos em curto prazo

**Fonte: NBR 10082 (2021).**

#### 2.4.2 ISO 10816-3

A ISO 10816-3 contempla a avaliação de vibração em máquinas industriais com potência acima de 15 kW e rotação entre 120 RPM e 15000 RPM, conforme classificação das Figuras 2.13 e 2.14.

Figura 2.13 – Classificação das máquinas conforme ISO 10816-3.

Classe	Descrição
Classe I	Máquinas grandes acima de 300 KW, *máquinas elétricas com altura de eixo H = ou > 315 mm.
Classe II	Máquinas médias de 15 a 300 KW, *máquinas elétricas com altura de eixo H de 160 a 315 mm.
Classe III	Bombas com rotor multiestágio com acionador <b>separado</b> (centrifugo, fluxo misto e fluxo axial) acima de 15 KW
Classe IV	Bombas com rotor multiestágio e com acionador <b>integrado</b> (centrifugo, fluxo misto e fluxo axial) acima de 15 KW

Fonte: Engfaz (2021).

Figura 2.14 – Níveis de vibração RMS em mm/s conforme ISO 10816-3.

Grupo	Tipo Base	BE	A1	A2
I	Rígida	2,30	4,5	7,1
	Flexível	3,50	7,1	11,0
II	Rígida	1,40	2,8	4,6
	Flexível	2,30	4,5	7,1
III	Rígida	2,30	4,5	7,1
	Flexível	3,50	7,1	11,0
IV	Rígida	1,40	2,8	4,6
	Flexível	2,30	4,5	7,1

Fonte: Engfaz (2021).

Sabendo-se a velocidade RMS, em mm/s, é possível determinar a condição real do equipamento, isto é, se possui ou não anormalidades, conforme ilustra a Figura 2.15.

Figura 2.15 – Estado da máquina de acordo com o alarme.

BE	Bom Estado	Equipamento em condições normais quanto aos níveis de vibração.
A1	Alarme 1	Equipamento em estado de <b>ATENÇÃO</b> . Existência de defeito inicial.
A2	Alarme 2	Equipamento em estado de <b>RISCO</b> . Existência de defeito relevante.

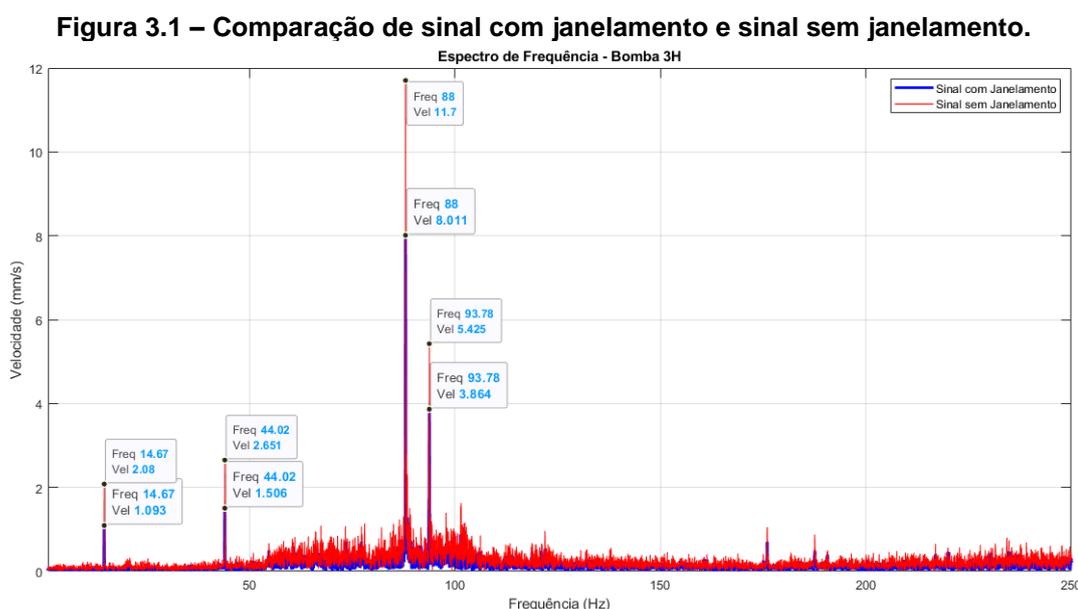
Fonte: Engfaz (2021).

### 3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Após as medições de vibração do conjunto é realizado o diagnóstico via análise espectral e avaliação dos níveis de vibração conforme NBR 10082 e ISO 10816-3.

Os espectros serão analisados, de forma sequencial, da bomba para o motor, priorizando o local de defeito em potencial.

Durante o processamento de sinais foi utilizado a técnica de “janelamento” de Hamming para cada medição de vibração, a afim de solucionar o problema de vazamento de sinal (energia), fenômeno conhecido como *leakage*, que é o surgimento de componentes de frequência fictícias no espectro do sinal. A Figura 3.1, espectro de frequência do lado acoplado da bomba – ponto horizontal, ilustra a diferença em um sinal com janelamento e sinal sem janelamento, pós FFT. O espectro com janelamento possui maior semelhança ao sinal original.



#### 3.1 PRIMEIRA MEDIÇÃO DE VIBRAÇÃO

A primeira medição do conjunto ocorreu em 13 de maio de 2022, respeitando os pontos de coleta da Tabela 2.3.

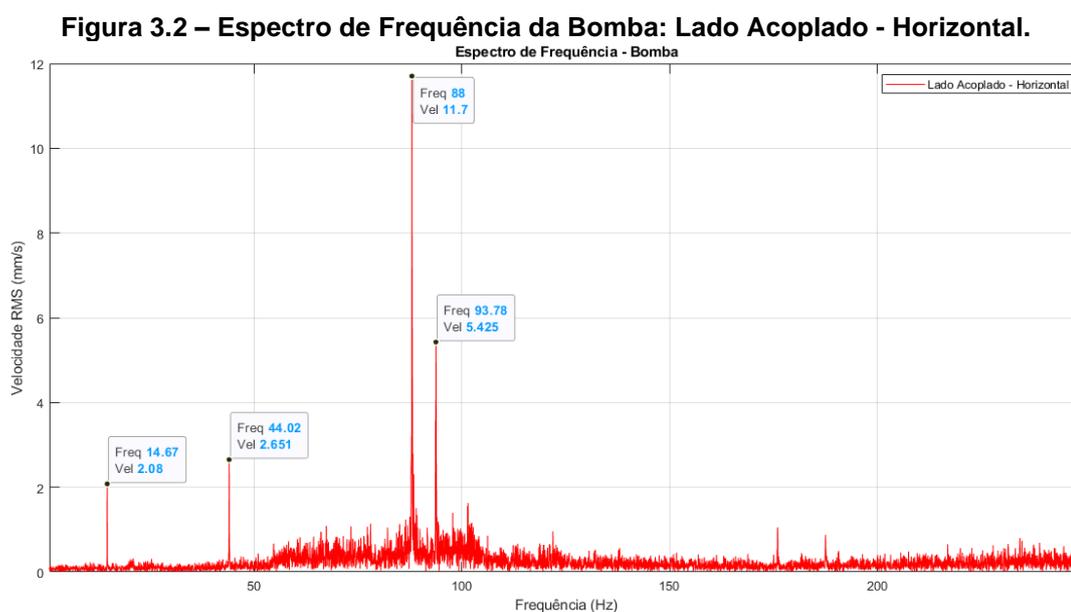
Para apoio à análise dos resultados é utilizada a tabela de defeitos e espectros da SKF (2004) disponível no APÊNDICE B para consulta.

### 3.1.1 Bomba Lado Acoplado

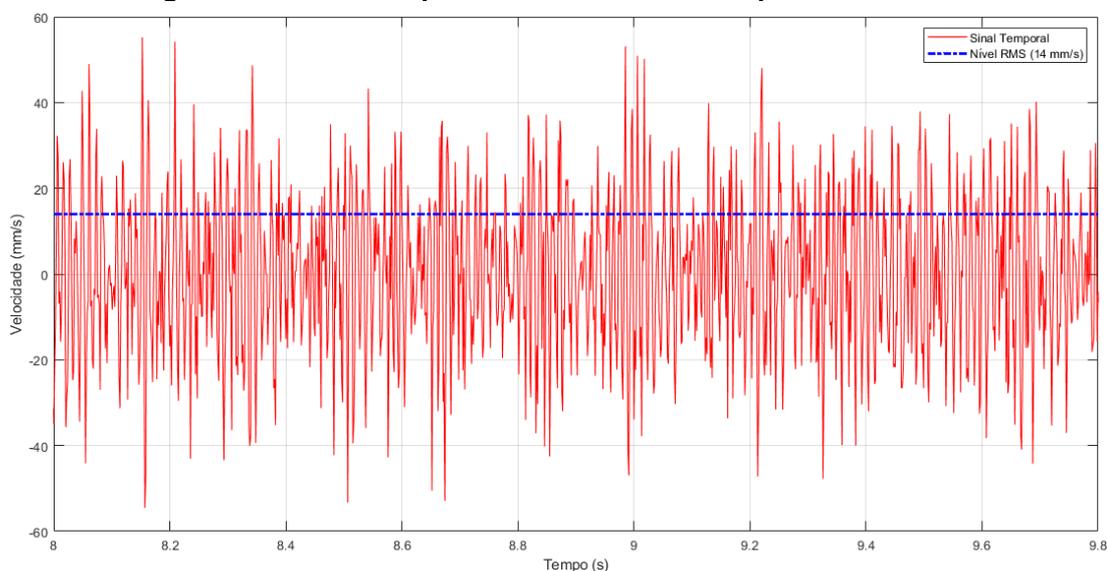
Analisando o espectro de frequência do ponto horizontal da bomba (Figura 3.2), local onde existe maior potencial de falha do conjunto mecânico, percebe-se a presença de harmônicos da rotação da máquina (880 rpm) de 1x ( $1 \times 880 / 60 = 14,7$  Hz) e 3x (44 Hz), acompanhado de um pico de alta amplitude em 6x (88 Hz). Como o espectro possui a presença de harmônicos de 1x, 2x e 6x, de acordo com a Tabela de defeitos (Apêndice B), a bomba possui desalinhamento de eixos. A frequência de 88 Hz, que está compreendida no intervalo (4x-8x) a rotação da máquina indica a presença de desalinhamento severo no conjunto mecânico. Nota-se que esse resultado é equivalente ao apresentado no relatório técnico de análise de vibração emitido pela empresa que presta serviços de preditiva, como mostrado no Anexo B.

De acordo com a NBR 10082 e ISO 10816-3, analisando a velocidade RMS (Figura 3.3) que possui amplitude 14 mm/s, a máquina está em estado de risco, necessitando programar, imediatamente, intervenção.

Além disso, o espectro do ponto horizontal possui a presença de 93,8 Hz, com amplitude 3,8 mm/s que, de acordo com as normas, o nível de vibração está anormal. Entretanto, um diagnóstico mais preciso desta frequência dar-se-á nas medições subsequentes.



**Figura 3.3 – Sinal Temporal da Bomba: Lado acoplado Horizontal.**



**Fonte: Autoria própria.**

No ponto vertical da bomba (Figura 3.4), assim como na posição horizontal, têm-se, novamente, a presença de harmônicos em 1x (14,7 Hz) e 6x (88 Hz), comportamento característico de desalinhamento. Entretanto, no ponto vertical, os níveis de vibração são menores quando se comparado ao horizontal, devido à maior rigidez da máquina nesta posição e, possivelmente, a fatores construtivos do acoplamento.

Outra frequência com alta amplitude no espectro do ponto vertical é de 187,5 Hz, com 2,9 mm/s. Um diagnóstico desta frequência se torna difícil, pois não coincide com harmônicos ou sub-harmônicos de rotação da máquina. Bem como, consultando a Tabela de Defeitos (Anexo B), não há nenhum padrão em específico para esta frequência.

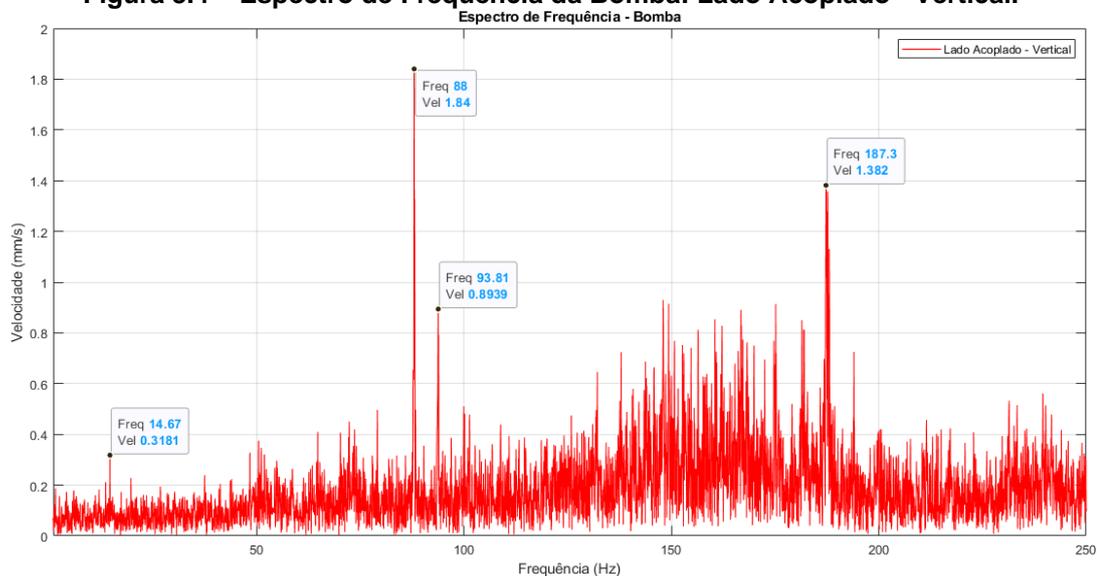
Além disso, têm-se a presença de 93,8 Hz.

O ponto axial (Figura 3.5), assim como os demais, indica, novamente, a presença de desalinhamento, pois apresenta harmônicos de 1x (14,7 Hz), 3x (44 Hz) e 6x (88 Hz). Todavia, se comparado com a amplitude do plano radial, pontos horizontal e vertical, a amplitude do ponto axial em 88 Hz, 0,83 mm/s, é muito menor.

Como o nível de vibração é mais elevado no plano radial é possível afirmar que o conjunto mecânico está com maior grau de desalinhamento paralelo se comparado ao desalinhamento angular.

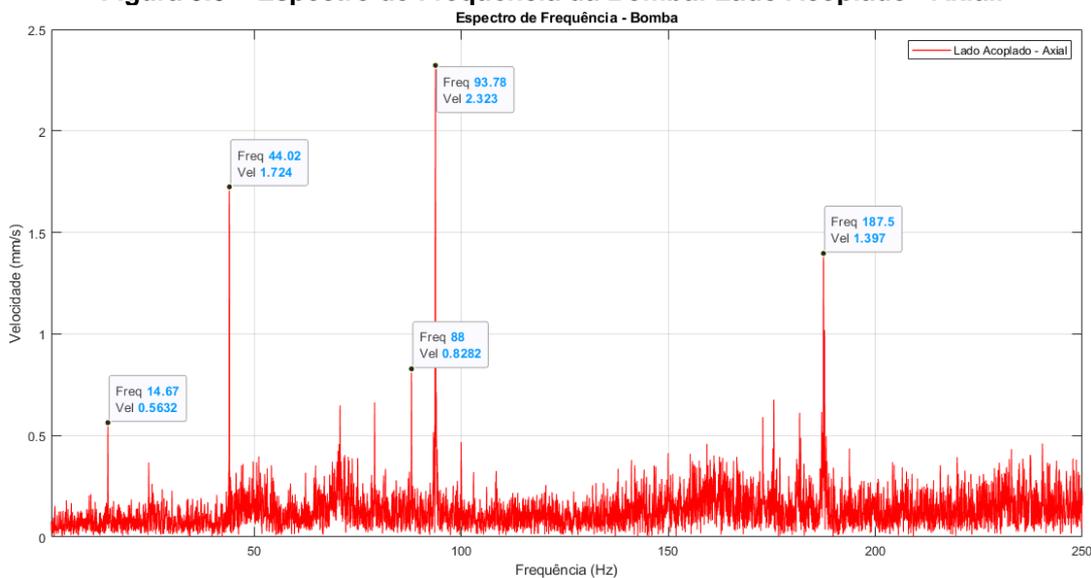
Além disso, têm-se a presença de 93,8 Hz e 187,5 Hz.

**Figura 3.4 – Espectro de Frequência da Bomba: Lado Acoplado - Vertical.**



Fonte: Autoria própria.

**Figura 3.5 – Espectro de Frequência da Bomba: Lado Acoplado - Axial.**



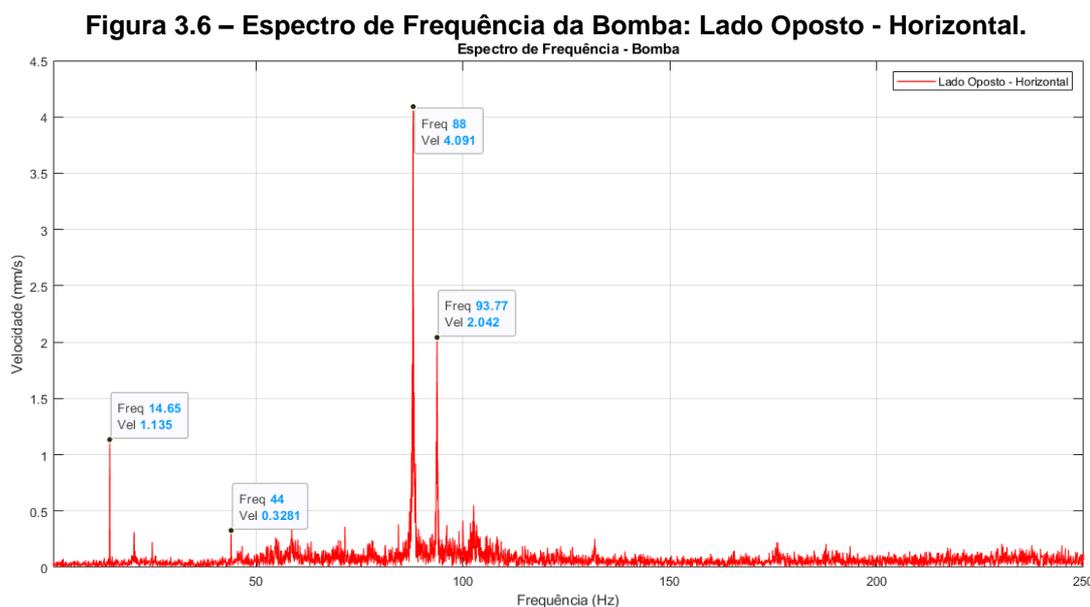
Fonte: Autoria própria.

### 3.1.2 Bomba Lado Oposto

Como no Lado Acoplado da bomba, dessa vez, no lado oposto – ponto horizontal (Figura 3.6) têm-se a presença de harmônicos de 1x (14,7 Hz), 3x (44 Hz) e 6x (88 Hz). Dessa vez, tendo o pico de amplitude em 88 Hz com 4,1 mm/s que, de acordo com as normas de análise de vibração, os níveis estão anormais, necessitando

programar intervenção. Evidenciando, mais uma vez, que o principal problema do conjunto mecânico é desalinhamento de eixos. É fato que o desalinhamento severo induz altas amplitudes, devido a própria montagem da máquina ser menos rígida horizontalmente.

Também no ponto horizontal têm-se a presença de 93,5 Hz com amplitude 2,0 mm/s.



**Fonte: Autoria própria.**

O ponto vertical (Figura 3.7) apresenta um espectro um pouco diferente dos demais. Dessa vez destacando o pico de alta amplitude em de 93,8 Hz, que estava em evidencia, só que em menor amplitude, nos demais pontos da bomba. Quando se tem alta amplitude na direção vertical, normalmente, este comportamento é característico de folga mecânica e/ou desgaste de componentes internos. Como a frequência de 93,8 Hz possui maior nível de vibração no Lado Oposto da bomba, algumas possibilidades surgem:

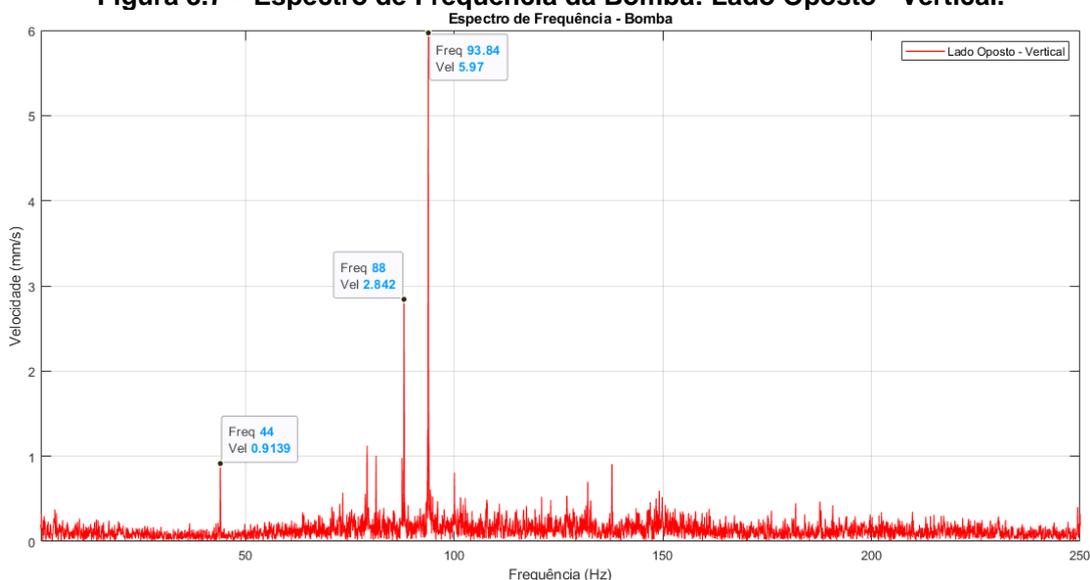
1. O rotor da bomba está com folga excessiva, devido algum mau ajuste com o eixo ou até mesmo com desgaste. Assim como o relatório técnico (Anexo B) menciona em “recomendação”.
2. Outros componentes da bomba podem estar desgastados e/ou com folga. Como: luva, chaveta, selo mecânico, porca do rotor;
3. Turbulência na linha de sucção ou recalque;

4. O desalinhamento severo está induzindo esta frequência.

Como a frequência de 93,8 Hz não é uma frequência harmônica ou sub-harmônica, bem como consultando a Tabela de Defeitos (Anexo B) não há nenhum padrão específico para esta frequência, um diagnóstico preciso torna-se difícil. O fato é que independentemente do tipo de defeito, o sinal possui 10,7 mm/s RMS (Figura 3.8), que de acordo com as normas os níveis estão anormais, necessitando programar intervenção.

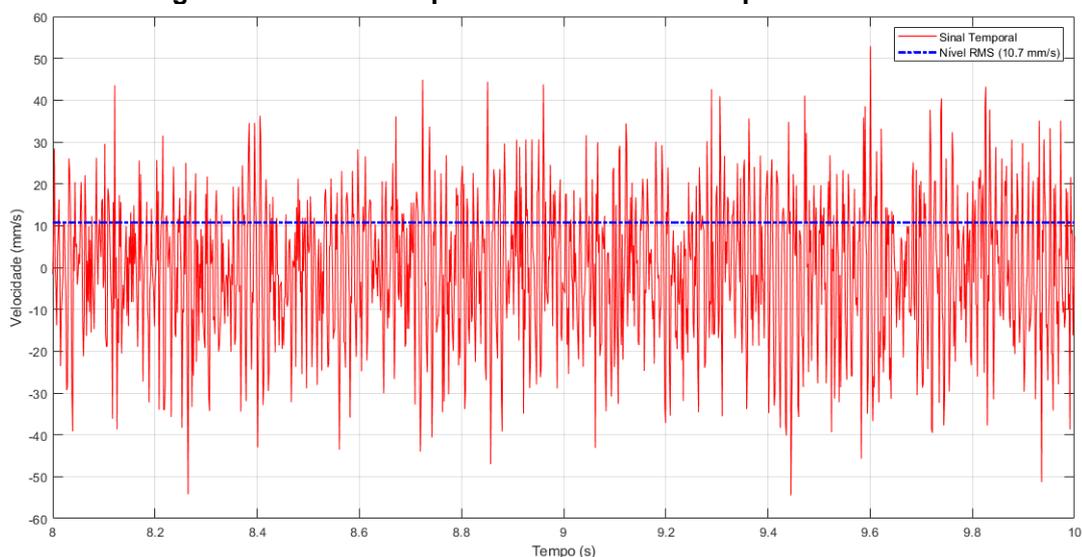
Também se têm a presença de harmônicos de 3x (44 Hz) e 6x (88 Hz) devido ao desalinhamento.

**Figura 3.7 – Espectro de Frequência da Bomba: Lado Oposto - Vertical.**



Fonte: Autoria própria.

**Figura 3.8 – Sinal Temporal da Bomba: Lado Oposto – Vertical.**



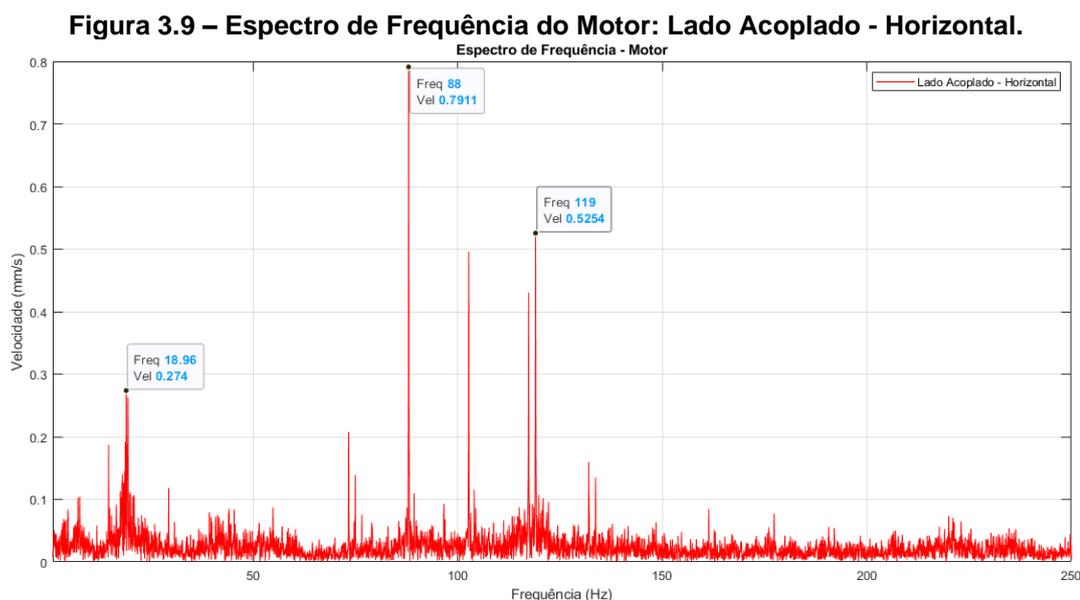
Fonte: Autoria própria.

### 3.1.3 Motor Lado Acoplado

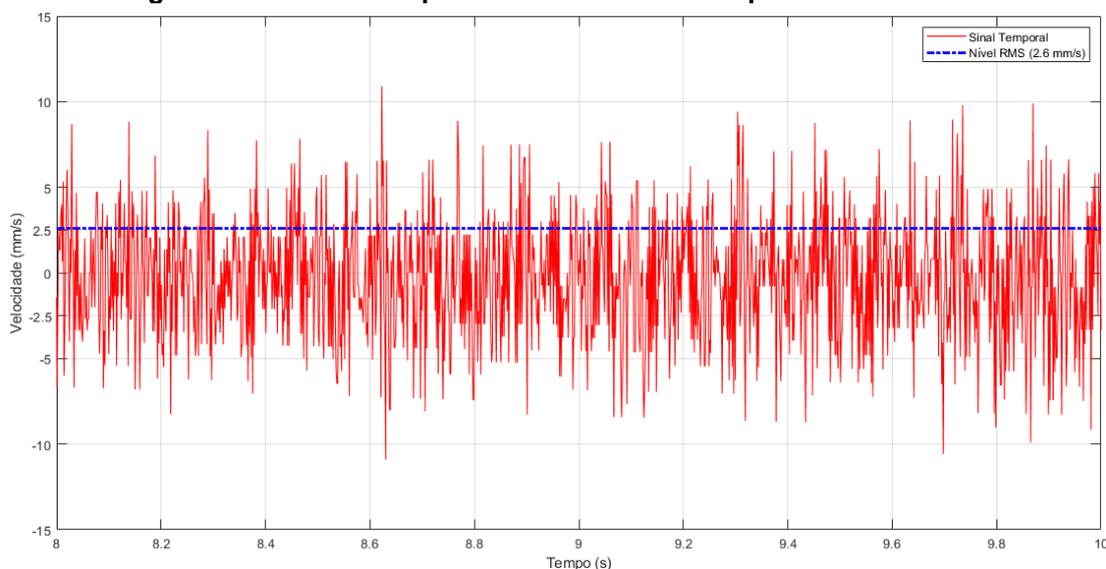
No ponto horizontal do Lado Acoplado do motor (Figura 3.9), têm-se a presença de harmônicos da rotação da máquina de 1x (14,7 Hz), 2x (29,3 Hz), 3x (44 Hz) e 6x (88 Hz), comportamento característico de desalinhamento, assim como identificado no Lado Acoplado da bomba. Entretanto, como o motor possui velocidade RMS de 2,6 mm/s (Figura 3.10), segundo a ISO 10816-3 a máquina está em estado de atenção.

Além da presença de desalinhamento, o espectro possui harmônicos de 1x a 10x da rotação da máquina. Com base na Tabela de Defeitos (Anexo B), tal comportamento é característico de folga mecânica. Apesar das amplitudes estarem normais, todavia, uma vez que o defeito é detectado no espectro, a tendência é que, ao longo do tempo, o defeito evolua.

A frequência de, aproximadamente, 20 Hz, demonstra a frequência de escorregamento do motor. Enquanto que a frequência de 120 Hz é característico de conectores solto, isto é, 2x a frequência de linha da rede. Todavia, segundo as normas, para ambos, o motor está em bom estado quanto aos níveis de vibração, não necessitando de programar intervenção.



**Figura 3.10 – Sinal Temporal do Motor: Lado Acoplado – Horizontal.**

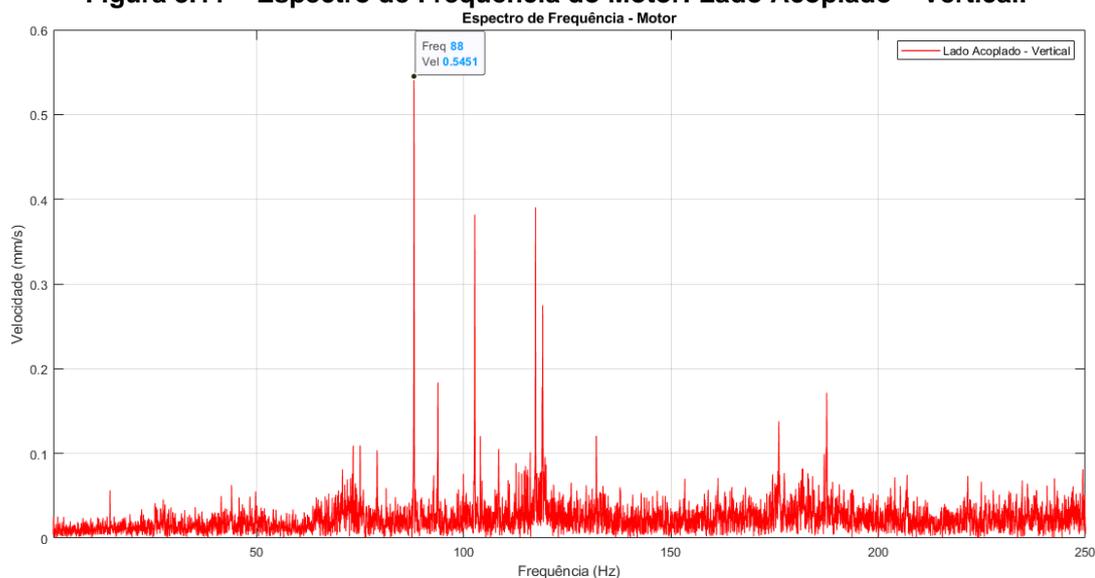


**Fonte: Autoria própria.**

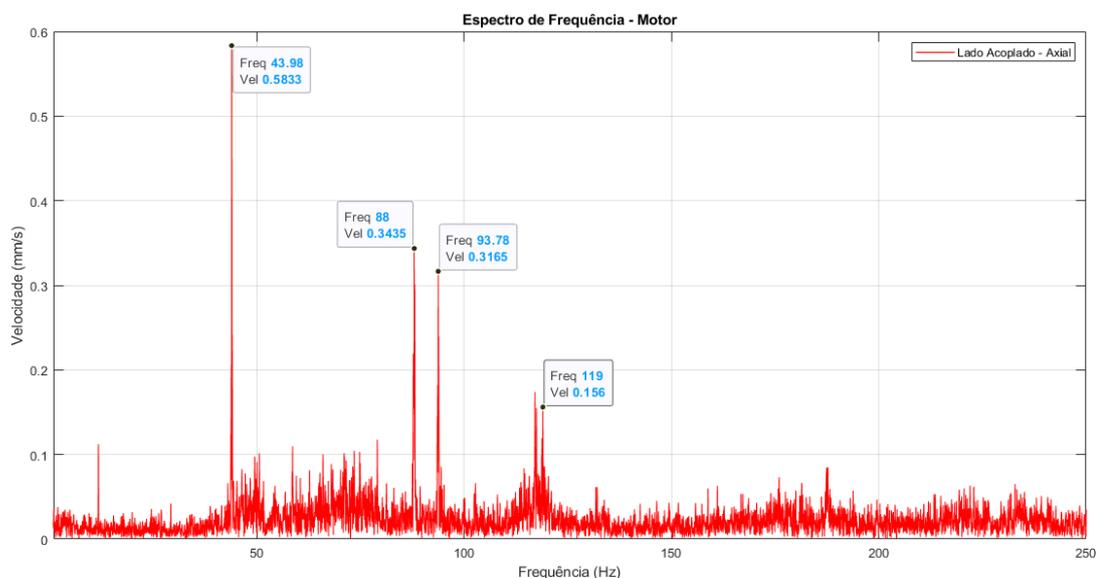
Para o ponto vertical (Figura 3.11), repete-se o comportamento da direção horizontal, isto é, presença de harmônicos da rotação da máquina e frequência de 88 Hz; da mesma forma, os níveis de vibração estão normais.

O ponto axial (Figura 3.12) possui praticamente mesmo espectro das demais posições, com níveis de vibração normais. Apenas apresenta a frequência de 93,8 Hz como diferença – assunto já tratado na parte da bomba.

**Figura 3.11 – Espectro de Frequência do Motor: Lado Acoplado – Vertical.**



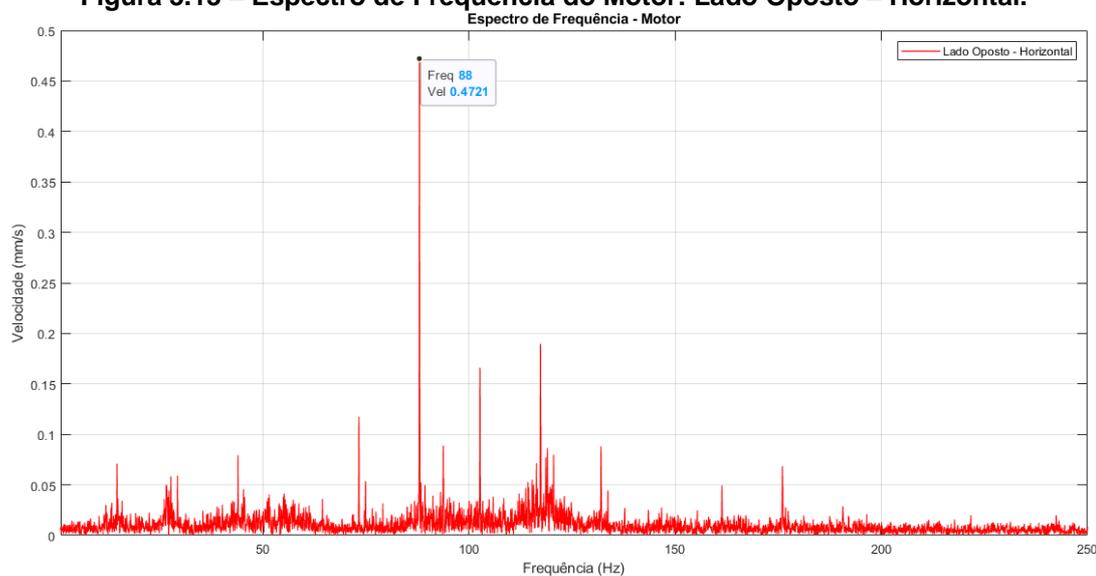
**Fonte: Autoria própria.**

**Figura 3.12 – Espectro de Frequência do Motor: Lado Acoplado – Axial.**

Fonte: Autoria própria.

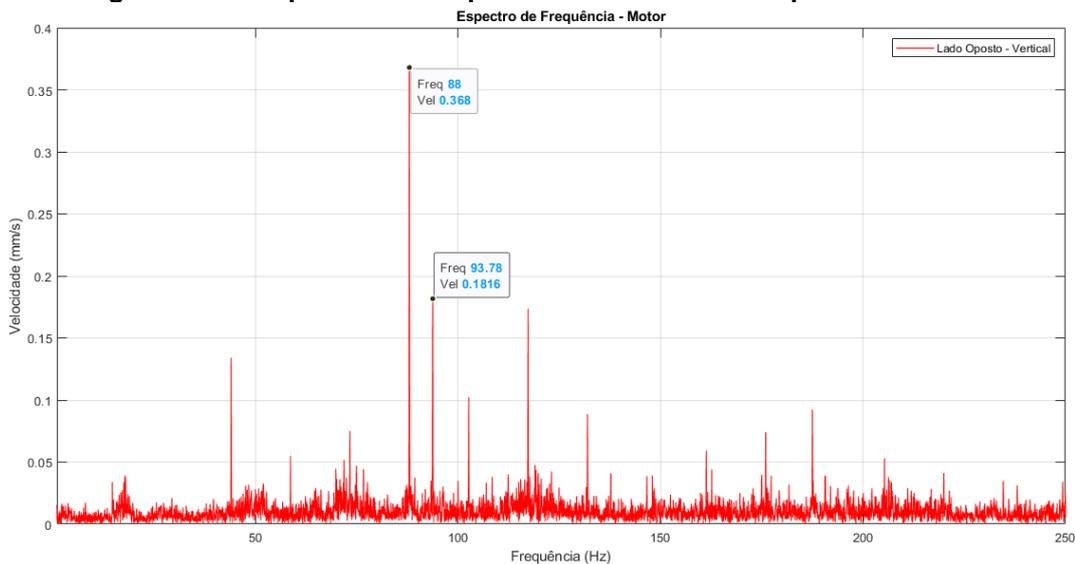
### 3.1.4 Motor Lado Oposto

Analisando os espectros de vibração do lado oposto do motor (Figuras 3.13 e 3.14), nota-se o mesmo padrão de comportamento lado acoplado, isto é, presença de harmônicos da rotação (1x a 12x) e 88 Hz, mudando apenas os níveis de vibração, que para o lado oposto são menores. Os níveis de vibração RMS, 1 mm/s, (Figura 3.15), de acordo com as normas, estão normais.

**Figura 3.13 – Espectro de Frequência do Motor: Lado Oposto – Horizontal.**

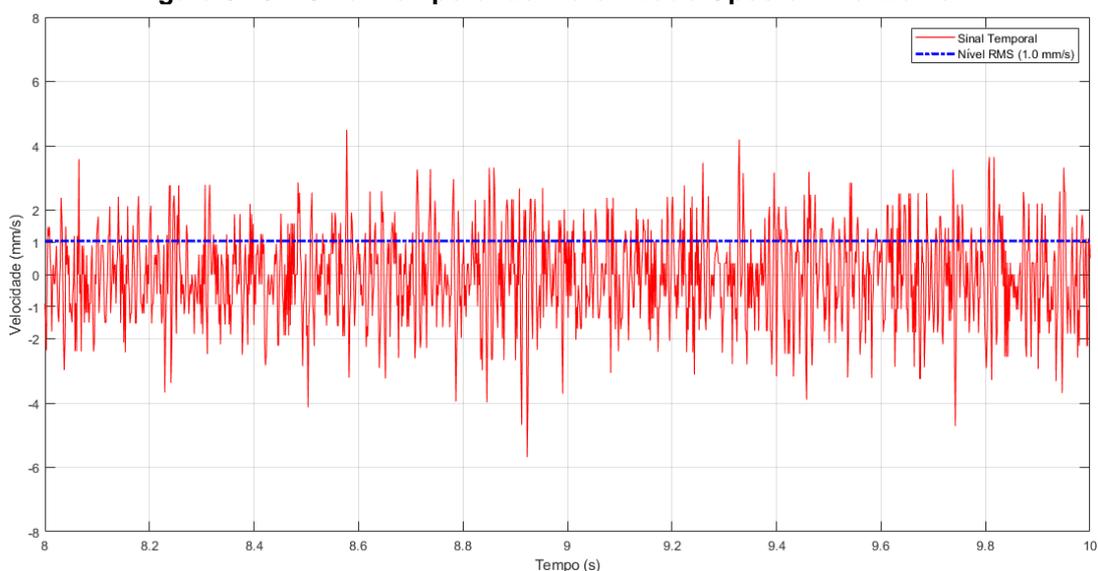
Fonte: Autoria própria.

**Figura 3.14 – Espectro de Frequência do Motor: Lado Oposto – Vertical.**



Fonte: Autoria própria.

**Figura 3.15 – Sinal Temporal do Motor: Lado Oposto – Horizontal.**



Fonte: Autoria própria.

## 3.2 MANUTENÇÃO NO CONJUNTO MECÂNICO

Na segunda quinzena de maio, atendendo a parada por oportunidade da planta industrial, a equipe de manutenção mecânica industrial constatou, via alinhador a laser, que os eixos da bomba e motor estavam realmente desalinhados. Diante disso, para conseguir realizar o alinhamento foi necessário soldar “macaquinhos” na base da bomba, a fim de possibilitar o seu deslocamento, e pós alinhamento, conferir

rigidez a base (Figura 3.16). Posteriormente, foi realizado o alinhamento entre eixos via alinhador a laser.

Entretanto, de acordo com a equipe de manutenção industrial, não foi possível realizar o alinhamento do conjunto de forma adequada, pois não é possível deslocar o motor, de forma axial ou horizontal, uma vez que os parafusos de fixação da base restringem seus movimentos nestas direções. Dessa forma, é necessário programar serviço de caldeiraria para alteração da base do motor para que possa alinhar o conjunto mecânico conforme ajustes técnicos.

**Figura 3.16 – “Macaquinhos” soldados na base da bomba: a) Lado esquerdo e b) Lado direito.**



**Fonte: Autoria própria.**

### 3.3 MEDIÇÃO DE VIBRAÇÃO APÓS INTERVENÇÃO

Após intervenção no conjunto mecânico, foi realizado uma nova medição, nos respectivos pontos do conjunto, conforme especificado anteriormente.

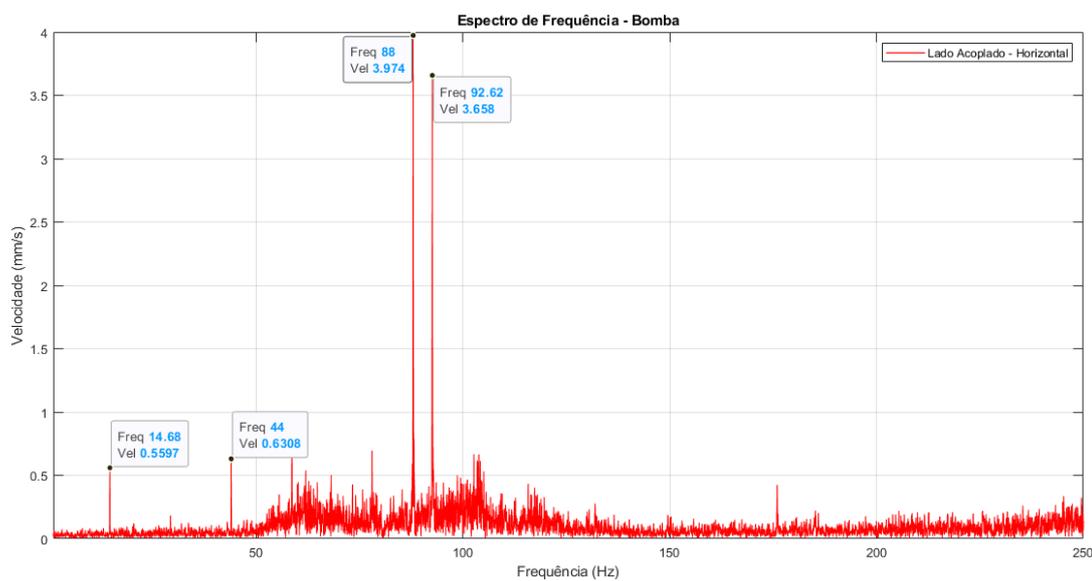
Como o principal defeito do conjunto mecânico está localizado no Lado Acoplado da bomba, apenas o espectro de frequência deste ponto é considerado neste novo diagnóstico.

Analisando o espectro de frequência do ponto horizontal (Figura 3.12), nota-se que o desalinhamento ainda persiste, tendo harmônicos da rotação da bomba de 1x (14,7 Hz), 2x (29,3 Hz), 3x (44 Hz) e 6x (88 Hz). Além da frequência de 93,8 Hz ainda persistir com praticamente mesma amplitude.

Apesar da redução no nível de vibração, de 8 mm/s para 3,9 mm/s em 88 Hz, enquanto que a velocidade RMS passou de 14 mm/s para 8,4 mm/s (Figura 3.13). De acordo com a NBR 10082 e ISO 10816-3, a bomba, e por consequência, todo o

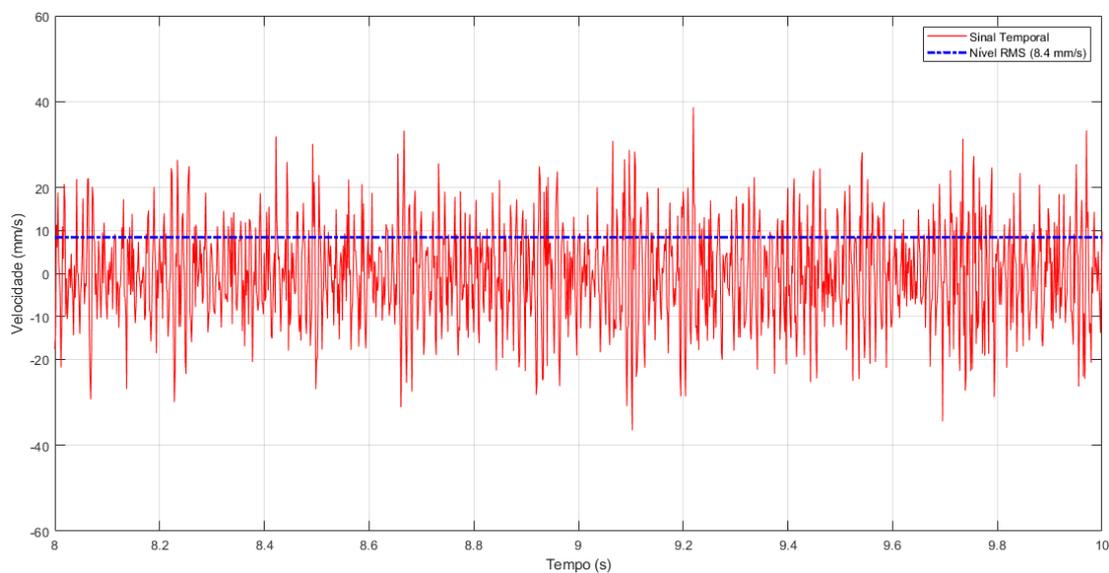
conjunto mecânico ainda permanece em estado de alerta, isto é, com níveis de vibração anormais, necessitando programar intervenção.

**Figura 3.12 – Espectro de Frequência da Bomba: Lado Acoplado - Horizontal.**



Fonte: Autoria própria.

**Figura 3.13 – Sinal Temporal da Bomba: Lado Acoplado – Horizontal, pós manutenção.**



Fonte: Autoria própria.

### 3.4 SÍNTESE DA ANÁLISE VIBRATÓRIA

Como forma de facilitar a análise de vibração foi criado uma síntese (Tabela 3.1), que apresenta, de forma detalhada, o diagnóstico da máquina para cada ponto de medição.

**Tabela 3.1 – Diagnóstico para cada ponto de medição do conjunto.**

<b>Máquina</b>	<b>Ponto de Medição</b>	<b>Valor RMS</b>	<b>Severidade</b>	<b>Frequência</b>	<b>Defeito Relacionado</b>
Motor LOA	Horizontal	1,0 mm/s	Normal	1x-12x	Folga Mecânica
Motor LA	Horizontal	2,6 mm/s	Atenção	88 Hz	Desalinhamento
Bomba LA	Horizontal	14 mm/s	Crítico	88 Hz	Desalinhamento
Bomba LOA	Vertical	10,7 mm/s	Crítico	93,8 Hz	Indefinido

**Fonte: Autoria própria.**

## 4 CONCLUSÕES

O sistema de baixo custo de aquisição de sinais provou-se como um sistema de alto desempenho e confiabilidade, visto que, quando se comparado ao relatório emitido pelo técnico de preditiva, observou-se um padrão semelhante de espectro de frequência. Dessa forma, pode-se utilizar o microcontrolador arduino e MPU6050 para diagnóstico de defeitos de baixa frequência.

Quanto ao sensor MPU6050, devido sua limitação de frequência destina-se apenas para defeitos de baixa frequência. Defeitos como cavitação, deficiência de lubrificação e, em alguns casos, falhas em rolamentos, tornam-se impossível a detecção. Outra limitação é sua temperatura de operação, pois em plantas industriais têm-se equipamentos que operam com temperaturas elevadas que danificariam o sensor.

Quanto a coleta de dados, apesar do protótipo ter se provado de alto desempenho e confiabilidade, têm-se dificuldade em acessar certos equipamentos, devido a própria geometria do local de instalação, assim como ambientes com alto nível de contaminação por água e/ou poeira, já que para realizar a coleta é necessário a utilização de *Notebook*. Outro ponto é a dificuldade em realizar a fixação do sensor nos equipamentos que possuem superfície irregular.

Quanto ao conjunto mecânico, apesar da redução dos níveis de vibração RMS e nos espectros, é necessário programar serviço de caldeiraria para realizar alterações na base do motor, a fim de possibilitar alinhamento correto do conjunto. Bem como, em parada por oportunidade da planta industrial deve-se realizar inspeção dos componentes internos da bomba para checar folgas excessivas ou desgastes.

## REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 10082. **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**. 21 de dezembro de 2021.

BANDEIRA, Guilherme; ABREU, Guilherme; GIANELLI, Rafael. **Vibração e ruído em manutenção preditiva**. Bauru: Universidade Estadual Julio de Mesquita Filho, 2010.

ENGEFAZ. **Análise de Vibração Nível I**. Apostila do Curso realizado na BP Bunge Bioenergia - Monteverde, Ponta Porã, Brasil, 2021.

ENGETELES. **Curva PF: o que é e como usar**. Jhonata Teles. Disponível em: <<https://engeteles.com.br/curva-pf/>>. Acesso em: 01 set. 2021.

GALLI, Vinícius Barcos. **Manutenção preditiva por análise de vibração mecânica em máquinas rotativas: estudo de caso**. 2017. 96 f. Trabalho de conclusão de curso (Bacharelado - Engenharia Mecânica) - Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, 2017. Disponível em: <<http://hdl.handle.net/11449/157012>>.

ISO 10816-3:2009, **Mechanical vibration — Evaluation of machine vibration by measurements on non-rotating parts — Part 3: Industrial machines with nominal power above 15 kW and nominal speeds between 120 r/min and 15 000 r/min when measured in situ**. Fevereiro de 2009.

MARÇAL, R.; SUSIN, A. **Detectando Falhas Incipientes Em Máquinas Rotativas**. Revista Gestão Industrial, 2005.

MENEZES, Pisco Araújo. **Análise de vibrações aplicada à detecção de falhas em rolamento de cubo de roda**. Disponível em: <[http://fga.unb.br/articles/0001/0318/TCC\\_1\\_-\\_Prisco.pdf](http://fga.unb.br/articles/0001/0318/TCC_1_-_Prisco.pdf)>. Acesso em 05 set 2021.

OPPENHEIM, Alan V; WILLSKY, Alan S. Com S. Hamid Nawab. **Sinais e Sistemas**. Tradução Daniel Vieira; revisão técnica Marcio Eisenkraft; Maria D. Miranda. – São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2010.

ROCHA, Diego Lilargem. **Análise de Vibrações em Equipamentos Rotativos de uma Indústria Alimentícia**. IFF, 2014. Disponível em: <<http://bd.centro.iff.edu.br/bitstream/123456789/1530/4/Documento.pdf>>. Acesso em: 19 de setembro de 2021.

SKF Realiability Systems. **Tecnologia de Vibrações**. 2004. Apostila do Curso realizado na BP Bunge Bioenergia - Monteverde, Ponta Porã, Brasil, 2021.

*Datasheet* MPU6050. Disponível em: <https://invensense.tdk.com/wpcontent/uploads/2015/02/MPU-6000-Datasheet1.pdf>> Acesso em 10 dezembro de 2021.

*Datasheet* Arduino Uno R3. Disponível em: <<https://docs.arduino.cc/static/dc92fbf5b6fd0d38636e78e83e25afc0/A000066-datasheet.pdf>>. Acesso em 10 dezembro de 2021.

## ANEXO A – DATASHEET BOMBA IMBIL BMI 250-580

 <b>Soluções em Bombeamento</b>		<b>FOLHA DE DADOS DO PRODUTO</b> Rua Jacob Audi, 690 - Itapira - SP - Cep: 13971-045 Fone: (0xx19) 3843.9833 Fax: (0xx19) 3863.0714 E-mail:ivendas@imbil.com.br * http://www.imbil.com.br		<b>Proposta:54047</b> <b>Seq.10</b> <b>ET-83105.8PR.000.6</b>				
<b>DADOS DO CLIENTE</b>								
Cliente: DEDINI S/A				TAG: B-510-9				
Equipamento: CONJUNTO MOTOBOMBA CENTRÍFUGA HORIZONTAL				Quantidade: 01				
<b>Condições de Operação</b>			<b>Dados construtivos</b>					
Líquido: FLEGMASSA			<b>Modelo: BMI 250-580</b> Bomba de eixo horizontal, monoestágio, sucção horizontal e recalque vertical, de construção "back pull-out", rotor aberto e eixo dotado de bucha protetora na região do engastamento.					
Temp.Op. Norm.: 105	Máx.: N/I	°C						
Peso Específico à T.O.:	0,999 kgf/dm <sup>3</sup>							
Viscosidade à T.O.:	1,0 cP							
Vazão Nominal/Projeto:	800/-- m <sup>3</sup> /h		<b>Bocais</b>	<b>Dn</b>	<b>Norma</b>	<b>Classe</b>	<b>Face</b>	<b>Pos.</b>
A.M.T Nominal/Projeto:	30/-- m		Sucção	300MM	ANSI B 16.5	150Lb	RF	HORIZ.
Pressão de sucção:	-- kgf/cm <sup>2</sup>		Descarga	250MM	ANSI B 16.5	150Lb	RF	VERT.
Pressão de descarga:	-- kgf/cm <sup>2</sup>		<b>Tipo:</b> <input checked="" type="checkbox"/> horizontal <input checked="" type="checkbox"/> back-pull out					
Pressão de diferencial:	3,0 kgf/cm <sup>2</sup>		<b>Corpo bipartido:</b> <input type="checkbox"/> axialmente <input checked="" type="checkbox"/> radialmente					
NPSH requerido/disponível:	2,1/N/I m		<b>Voluta:</b> <input checked="" type="checkbox"/> simples <input type="checkbox"/> dupla <input type="checkbox"/> difusor					
Rotação:	880 rpm		<b>Número de Estágios:</b> 1					
Rendimento:	83 %		<b>Montagem:</b> <input type="checkbox"/> suporte <input checked="" type="checkbox"/> pé <input type="checkbox"/> linha de centro					
Potência consumida:	107,1 cv		<b>Rotor:</b> <input type="checkbox"/> fechado <input checked="" type="checkbox"/> aberto <input type="checkbox"/> tubular <input type="checkbox"/> vortex					
Motor Recomendado:	125 cv		<b>Entrada:</b> <input checked="" type="checkbox"/> simples <input type="checkbox"/> dupla					
AMT Máx. (Q=0 m <sup>3</sup> /h):	39 m		<b>Montagem:</b> <input checked="" type="checkbox"/> em balanço <input type="checkbox"/> entre mancais					
Vazão Mínima Contínua:	300 m <sup>3</sup> /h		<b>Fluxo:</b> <input checked="" type="checkbox"/> radial <input type="checkbox"/> mixto					
			<b>Diâmetro[mm]:</b> máx.:572 mín.:445 projeto:550					
			<b>Mancais:</b> rolamentos					
			<b>Lubrificação:</b> <input checked="" type="checkbox"/> óleo <input type="checkbox"/> graxa					
			<b>Vedação:</b> <input type="checkbox"/> gaxeta <input checked="" type="checkbox"/> selo mecânico					
<b>Acessórios</b>			<b>Líquido de Fonte Externa:</b> <input checked="" type="checkbox"/> com <input type="checkbox"/> sem					
Base: <input type="checkbox"/> chapa de aço dobrada <input checked="" type="checkbox"/> viga U - estrutural			<b>Câmara de resfriamento:</b> <input type="checkbox"/> com <input checked="" type="checkbox"/> sem					
Protetor de Acoplamento : <input checked="" type="checkbox"/> aço <input type="checkbox"/> alumínio			<b>Conexões:</b> <input checked="" type="checkbox"/> respiro <input checked="" type="checkbox"/> dreno <input checked="" type="checkbox"/> manômetro					
Acoplamento/Fabricante: ANTARES			<b>Roscas:</b> <input type="checkbox"/> NPT <input checked="" type="checkbox"/> BSP					
Tam.: AT-90I Esp.[mm]: N/A			<b>Rotação (visto lado acop.):</b> <input checked="" type="checkbox"/> horária <input type="checkbox"/> anti-horária					
Forn.: por: <input checked="" type="checkbox"/> IMBIL <input type="checkbox"/> Cliente			<b>Pintura:</b> <input checked="" type="checkbox"/> padrão IMBIL <input type="checkbox"/> especial					
Motor/Marca: WEG Linha: Alto Rend.								
Pot.[cv]: 125 Rot. [rpm]: 880 F.S.: 1.15								
Proteção: IPW55 Tensão [V]: 220/380/440 Isol.: F								
Tipo:TFVE Categoria: N Carc.: 315S/M F.C.: B3D								
Pintura: <input checked="" type="checkbox"/> Padrão <input type="checkbox"/> Especial								
Forn.: por: <input checked="" type="checkbox"/> IMBIL <input type="checkbox"/> Cliente								
Gaxeta/Tamanho: N/A								
Material:								
Selo Mecânico/Marca: BURGMANN			<b>Documentação Técnica</b>					
Tipo: M477 Código: -			<input checked="" type="checkbox"/> Teste Hidrostático		Inspeção sim <input type="checkbox"/> não <input checked="" type="checkbox"/>			
Código API: - Plano de Selagem: 51			<input checked="" type="checkbox"/> Teste de Performance		Inspeção sim <input type="checkbox"/> não <input checked="" type="checkbox"/>			
Forn.: por: <input checked="" type="checkbox"/> IMBIL <input type="checkbox"/> Cliente			<input type="checkbox"/> Teste de NPSH		Inspeção sim <input type="checkbox"/> não <input type="checkbox"/>			
Outros:			<input type="checkbox"/> Vibração		Inspeção sim <input type="checkbox"/> não <input type="checkbox"/>			
			<input type="checkbox"/> Ruído		Inspeção sim <input type="checkbox"/> não <input type="checkbox"/>			
			<input type="checkbox"/> Pintura		Inspeção sim <input type="checkbox"/> não <input type="checkbox"/>			
			<input type="checkbox"/> Análise de Material					
			<input type="checkbox"/> Desmontagem após testes					
			<b>Inspeção Final c/ Acompanhamento</b>					
<b>Material Construtivo</b>								
Corpo / Tampa	ASTM A351 CF8M	Anel Desgaste		Corpo Sucção				
Rotor	ASTM A351 CF8M	Placa Desgaste		Corpo Estágio				
Eixo	SAE 1045	Mancal		Difusor				
Bucha Protetora	AISI 316	Corpo Pressão						
Notas: N/A-Não Aplicável # N/I-Não Informado. 1 - Incluso jg de chumbadores, embalagem e documentação/desenhos padrão Imbil. 2 - Plano 51: Fonte externa de água limpa conectada à sobreposta, com pressão máxima de 0,8 Kgf/cm <sup>2</sup> e vazão de 10 l/min.								
Itapira-SP, 13/06/2008				Responsável:				

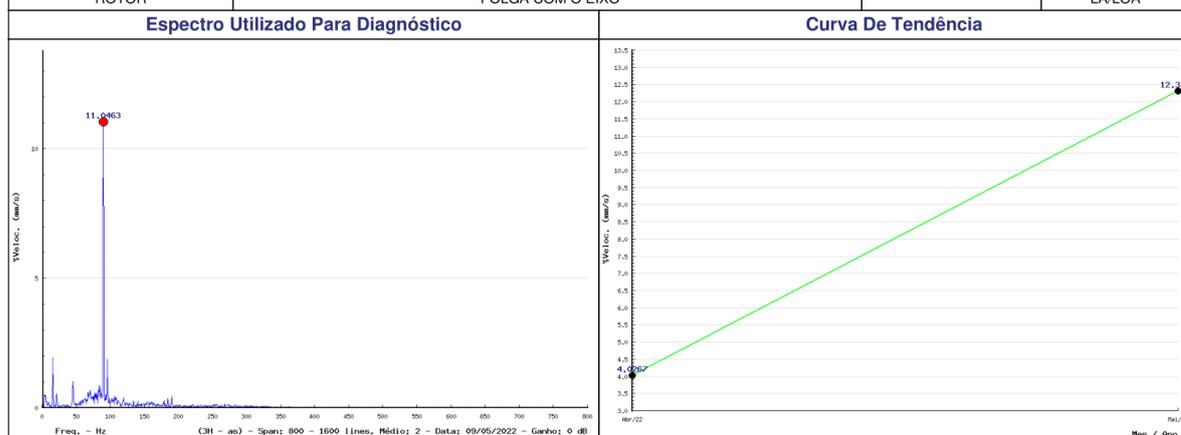
## ANEXO B – RELATÓRIO TÉCNICO DE ANÁLISE DE VIBRAÇÃO

Relatório de Análise de Vibração - Diagnóstico, Prognóstico (RDP)			
Data de Coleta: 09/05/2022		Data de Análise: 10/05/2022	
Planta: BP BUNGE - MONTE VERDE/MS			RDP Nº 00804

Área	Setor	Conjunto Rotativo	TAG	Equipamento	TAG
FERMENTAÇÃO	FERMENTAÇÃO	BOMBA FLEGMAÇA	B.510.9	BOMBA	

### Diagnóstico

Elemento	Defeito Encontrado	Especificação	Posição
EIXO	*DESALINHAMENTO		LA/LOA
ROTOR	*FOLGA COM O EIXO		LA/LOA



### Recomendação

Ação Recomendada	Prazo recomendado para intervenção
APRESENTA VIBRAÇÃO EM 1X A ROTAÇÃO NA DIREÇÃO AXIAL, PROVENIENTE DE DESALINHAMENTO COM AGRAVANTE DE FOLGAS ROTATIVAS. MELHORAR FIXAÇÃO DO CONJUNTO SE ATENTANDO PARA O ESTADO DE CONSERVAÇÃO DA BASE, INSPECIONAR ACOPLAMENTO/ROTOR QUANTO À DESGASTES / FOLGAS E CORRIGIR ALINHAMENTO COM ALINHADOR À LASER.	4 - Semana(s)

Analista:

Aprovado por :

Para uso do cliente	PSM / O.S.	Data da intervenção	Tempo gasto na intervenção	Tempo de parada do equipamento	Nome do responsável pela intervenção

### Relatório de Conclusão de Intervenção (RCI)

01. O defeito encontrado na prática foi igual o diagnosticado ?  
 Sim  Não havia defeito algum  Não correspondia ao diagnóstico. Qual à encontrada ?
02. As informações de tag's, locais de instalação, componentes defeituosos estavam completamente corretas ?  
 Sim  Não. Quais são as corretas?
03. A posição indicada do componente defeituoso estava correta ?  
 Sim  Não. Qual é a correta ?
04. Além da ação recomendada foi executada mais alguma intervenção ?  
 Não  Sim. Qual(is) ?

Classificação do tipo de defeito acordado entre / BP BUNGE - MONTE VERDE/MS

Sucesso  Imprecisão  Defeito virtual

Análise da  
classificação  
acordada por:

BP BUNGE - MONTE VERDE/MS

## APÊNDICE A – PROGRAMAÇÃO ARDUINO

```

/*
  Programa para Leitura do sensor de Aceleração Triaxial MPU6050
  Leitura feita via barramento I2C, impressão na Serial para ser visualizada com o Serial
  Plotter do Arduino IDE

  Componentes:
  - Arduino UNO R3;
  - Sensor MPU-6050 (Placa GY-521)
  */

// Inclusão das Bibliotecas
#include<Wire.h> //Estabelecer comunicação com a interface I2c

// Endereco I2C do sensor MPU-6050 [Em Hexadecimal]
const int MPU = 0x68; //O pino AD0 desconectado define que o endereço I2C do sensor é
0x68.

// Variaveis para armazenar valores do sensor
float AccX, AccY, AccZ;

void setup() {
  // Inicializa Serial
  Serial.begin(115200); //Taxa de transmissão de 115200 bits/s do Monitor Serial IDE
  delay(3000);

  // Inicializa o MPU-6050
  Wire.begin();
  Wire.setClock(400000); // 400kHz I2C clock - clock frequency)
  Wire.beginTransmission(MPU);
  Wire.write(0x6B); //Endereço do MPU6050
  Wire.write(0);
  Wire.endTransmission();

  // Configura Acelerometro para fundo de escala desejado
  /*
  Wire.write(0b00000000); // fundo de escala em +/-2g
  Wire.write(0b00001000); // fundo de escala em +/-4g
  Wire.write(0b00010000); // fundo de escala em +/-8g
  */

```

```

Wire.write(0b00011000); // fundo de escala em +/-16g
*/
Wire.beginTransaction(MPU);
Wire.write(0x1C);
Wire.write(0b00000000); // Trocar esse comando para fundo de escala desejado conforme
acima
Wire.endTransmission();

//Configura a Largura de Banda
Wire.beginTransaction(MPU);
Wire.write(0x1A);
Wire.write(0x00); //260HZ
Wire.endTransmission();

//Impressao - identificação das variaveis
Serial.print(" AccX");
Serial.print("\t");
Serial.print(" AccY");
Serial.print("\t");
Serial.println(" AccZ");
}

void loop() {
// Comandos para iniciar transmissão de dados
Wire.beginTransaction(MPU);
Wire.write(0x3B); //Enfileira os bytes a ser transmitido para o sensor - Começando com o
registro 0x3B (ACCEL_XOUT_H)
Wire.endTransmission(false); //Envia msg de restart ao sensor e o barramento nao será
liberado
Wire.requestFrom(MPU, 6, true); // Solicita os dados ao sensor - 6 bytes - 2 de cada vez
high and Low p/ cada variavel

// Armazena o valor dos sensores nas variaveis correspondentes
AccX = Wire.read() << 8 | Wire.read(); //0x3B (ACCEL_XOUT_H) & 0x3C
(ACCEL_XOUT_L) //Lógico OR (<< 8) - gravando 2 bytes de uma vez em cada variável - 1 byte = 8
bits
AccY = Wire.read() << 8 | Wire.read(); //0x3D (ACCEL_YOUT_H) & 0x3E
(ACCEL_YOUT_L)
AccZ = Wire.read() << 8 | Wire.read(); //0x3F (ACCEL_ZOUT_H) & 0x40 (ACCEL_ZOUT_L)

```

```
// Imprime na Serial os valores obtidos (converter de bits para aceleração g)
/* Alterar divisão conforme fundo de escala escolhido:
Acelerômetro
+/-2g = 16384
+/-4g = 8192
+/-8g = 4096
+/-16g = 2048
*/

//Impressão Monitor Serial (-1 desconsiderar aceleração gravitacional)

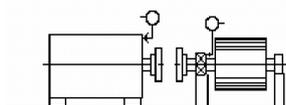
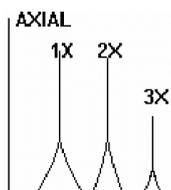
Serial.print(AccX / 16384 -1);
Serial.print("\t");
Serial.print(AccY / 16384);
Serial.print("\t");
Serial.println(AccZ / 16384);
}
```

## APÊNDICE B – TABELA DE DEFEITOS E ESPECTROS

Tabela de defeitos e espectros adaptado de SKF (2004).

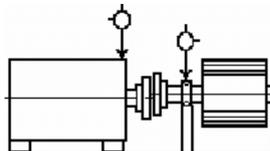
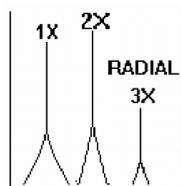
### DESALINHAMENTO

#### A – ANGULAR



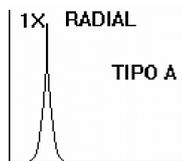
O Desalinhamento Angular é caracterizado pela alta vibração axial, 180° fora de fase através do acoplamento. Caracteristicamente haverá alta vibração axial tanto com 1X quanto com 2X RPM. Entretanto não é incomum que 1X, 2X ou 3X sejam dominantes. Estes sintomas podem indicar também problemas de acoplamento.

#### B- PARALELO

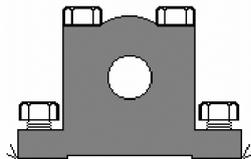
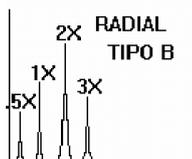


Desalinhamento Paralelo tem sintomas similares ao Angular, mas apresenta vibração radial alta que se aproxima de 180° fora de fase através do acoplamento. 2X é muitas vezes maior que 1X, mas sua altura relativa para 1X é habitualmente ditada pelo tipo e construção do acoplamento. Quando o Desalinhamento Angular ou Radial se torna severo, pode gerar picos de alta amplitude em harmônicos muito mais altos (4X-8X) ou mesmo toda uma série de harmônicos de alta frequência similar na aparência à folga mecânica. A construção do acoplamento influenciará muitas vezes a forma do espectro quando o Desalinhamento é severo.

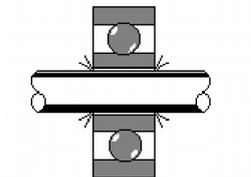
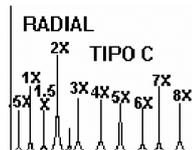
### FOLGA MECÂNICA



A folga Mecânica é indicada pelos espectros dos tipos A, B e C. O Tipo A é causado por folga/fragilidade Estrutural nos pés, base ou fundação da máquina; também pela deterioração do apoio ao solo, folga de parafusos que sustentam a base; e distorção da armação ou base (ex.: pé frouxo). A análise de fase revelará aproximadamente 180° de diferença de fases entre medições verticais no pé da máquina, local onde está a base e a própria base.



O tipo B é geralmente causado por parafusos soltos no apoio da base, trincas na estrutura do skid ou no pedestal do mancal.



O tipo C é normalmente provocado por ajuste impróprio entre partes componentes para forças dinâmicas do rotor. Causa o truncamento da forma de onda no tempo. O tipo C é muitas vezes provocado por uma folga linear do mancal em sua tampa, folga excessiva em uma bucha ou de elemento rotativo de um mancal de rolamento ou um rotor solto com folga em relação ao eixo. A fase tipo CX é muitas vezes instável e pode variar amplamente de uma medição para a seguinte, particularmente se o rotor muda de posição no eixo à cada partida. A folga Mecânica é, geralmente, altamente direcional e pode causar leituras bem diferentes se comparamos incrementos de 30° de nível na direção radial em todo o caminho em torno de uma caixa de mancal. Observe também que a folga causará muitas vezes múltiplos de sub-harmônicos a exatamente 1/2 ou 1/3 RPM (.5X, 1.5X, 2.5X, etc.).

## PROBLEMAS ELÉTRICOS

### ESPECTRO TÍPICO

**A - EXCENTRICIDADE DO ESTATOR  
LAMINAS EM CURTO  
FERRO SOLTTO**



### OBSERVAÇÕES

Problemas no estator geram vibração alta em 2X a frequência da linha (2FL=120Hz). Problemas no estator produzem um espaço vazio estacionário desigual entre o Rotor e o Estator, o que produz uma alta vibração bem definida em frequência. O Air Gap Diferencial (Entreferro) não deve exceder 5% para motores de indução e 10% para motores síncronos. Pés amortecidos ou bases isoladas podem acarretar a excentricidade do estator. O ferro solto é devido à fragilidade ou a folga do suporte do estator. Lâminas do estator curto-circuitadas podem causar aquecimento localizado irregular, o que pode fazer curvar o eixo do motor, produzindo vibração induzida termicamente que pode crescer significativamente ao longo do tempo de operação.

**B- ROTOR EXCENTRICO**

**AIR GAP VARIÁVEL**

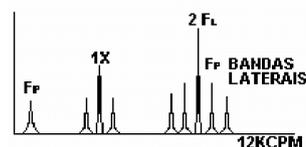
$F_L = \text{FREQUENCIA DA LINHA}$

$N_s = \text{VELOCIDADE SINCRONA} = \frac{120 F_L}{P}$

$F_s = \text{FREQ. ESCORREGAMENTO} = N_s \times \text{RPM}$

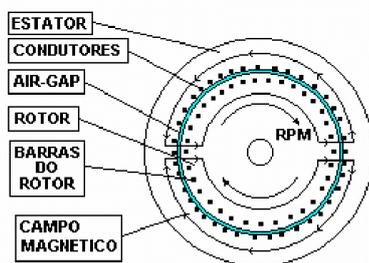
$F_p = \text{FREQUENCIA DE PASSAGEM DE POLOS} = F_s \times P$

$P = \text{No. POLOS}$



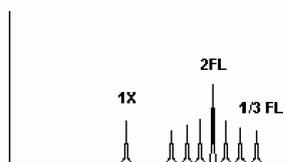
Rotores excêntricos produzem um Air Gap (entre-ferro) entre o rotor e o estator que induz à vibração pulsante (normalmente entre 2 FL e o harmônico da velocidade de operação mais próximo). Muitas vezes exige um "zoom" do espectro para separar 2FL e harmônicos da velocidade de operação. Rotores excêntricos geram 2 FL cercado de bandas laterais de Passagem de Polo (FP), bem como bandas laterais em volta da velocidade de operação. A própria FP aparece em frequência baixa (Frequência de Passagem de Polo = Frequência de Escorregamento X No.de Pólos). Valores comuns de FP vão de aproximadamente 20 a 120 CPM (.30 a 2.0 Hz).

**C - PROBLEMAS DE ROTORES**



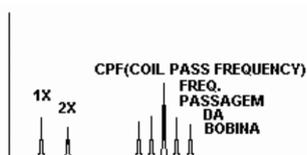
Anéis de Curto e/ou Barras de Rotor trincadas ou quebradas, Soldas ruins entre Barras e Anéis em curto, ou Laminas do Rotor Curto-circuitadas, produzirão alta vibração na velocidade de operação 1X com bandas laterais iguais à Frequência de Passagem de Polo (FP) ou 2X Frequência de Sincronismo. Além disso, Barras de Rotor quebradas gerarão muitas vezes bandas laterais (FP ou 2Fs) em volta do terceiro, quarto e quinto harmônicos da velocidade de operação. Barras do rotor frouxas são indicadas por bandas laterais de espaçamento igual à 2xFrequência da Linha (2FL) em torno da Frequência de Passagem de Barras do Rotor (RBPF) e/ou seus Harmônicos (RBPF = Número de Barras x RPM). Muitas vezes causará níveis altos em 2 X RBPF, com apenas uma pequena amplitude em 1X RBPF).

**D - PROBLEMA DE FASE  
(CONECTOR SOLTTO)**



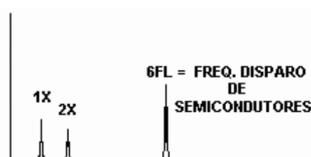
Problemas de Fase devidos a conectores frouxos ou partidos podem causar uma vibração excessiva em 2 X da Frequência da Linha (2 FL), a qual terá bandas laterais em sua volta em 1/3 da Frequência da Linha (1/3 FL). Níveis em 2FL poderão ultrapassar 1.0 polegada/segundo se o problema não for corrigido. Isto será particularmente problemático se o conector defeituoso fechar e abrir contato periodicamente

**E - MOTORES SINCRONOS  
(BOBINA ESTATOR SOLTIA)**



Bobinas do Estator frouxas, em motores síncronos, gerarão nitidamente alta vibração na Frequência de Passagem da Bobina (CPF), que é igual ao Número de Bobinas do Estator x RPM (No. Bobinas do Estator = No. Pólos x No. Bobinas/Polo). A Frequência de Passagem da Bobina terá em sua volta bandas laterais de 1 X RPM.

**F - PROBLEMAS MOTORES  
CORRENTE CONTINUA**



Problemas em motores de CC podem ser detectados por amplitudes maiores que a normal na Frequência de Disparo de SCR (6FL) e seus harmônicos. Estes problemas incluem enrolamentos de campo partidos, SCR com mau funcionamento e conexões soltas. Outros problemas, inclusive fusíveis queimados ou soltos e cartões de controle em curto, podem causar picos de grande amplitude em Frequências da Linha de 1 X até 5X (3600 - 18000 CPM).