

# APRENDIZADO DE MÁQUINAS APLICADO NA PREVISÃO DE FALHAS EM PENEIRAS VIBRATÓRIAS

## *MACHINE LEARNING APPLIED IN THE PREDICTION OF FAILURES IN VIBRATING SCREENS*

Yris Castilho Campos Gonçalves<sup>1</sup>  
Jonathan Oliveira Nery<sup>2</sup>

### RESUMO

Este trabalho apresenta um estudo sobre a aplicação de aprendizado de máquina à técnica de manutenção preditiva, mais especificamente, análise de vibração de peneiras vibratórias, com objetivo de reduzir o tempo de resposta para diagnóstico de defeitos presentes nos equipamentos via análise de vibrações. Tal abordagem se justifica pela carência de pesquisas acadêmicas a respeito do peneiramento de grãos e as falhas vibracionais existentes neste processo, contribuindo assim na redução de paradas e redução de custo na atividade de peneiramento, contribuindo também em outros estudos as áreas da engenharia. Este propósito será conseguido através da pesquisa bibliográfica e análise preliminar sobre o tema, seguido de uma pesquisa qualitativa, de caráter exploratório, o que irá viabilizar as análises que serão realizadas ao longo do trabalho. O estudo comprovou que o uso de algoritmos de aprendizado de máquinas auxilia notavelmente na visualização e na análise de dados vibracionais, resultando em análises não somente mais rápidas, mas também com maior confiabilidade e assertividade.

**Palavras chave:** Peneira vibratória. Manutenção preditiva. Análise de vibração. Aprendizado de máquina

### ABSTRACT

*This work presents a study on the application of machine learning to the predictive maintenance technique, more specifically, vibration analysis of vibrating screens, with the objective of reducing the response time for diagnosis of defects present in the equipment via vibration analysis. Such approach is justified by the lack of academic research on the sieving of grains and the existing vibrational failures in this process, thus contributing to the reduction of downtime and cost reduction in the activity of sieving, also contributing in other studies the areas of engineering. This purpose will be achieved through bibliographic research and preliminary analysis on the subject, followed by a qualitative research, of exploratory character, which will make possible the analyses that will be carried out throughout the work. The study proved that the use of machine learning algorithms helps notably in the visualization and analysis of vibrational data, resulting in analyses not only faster, but also with greater reliability and assertiveness.*

**Keywords:** *Vibrating screen. Predictive maintenance. Vibration analysis. Machine learning*

---

<sup>1</sup> Graduanda do curso de Engenharia de Produção do Centro Universitário do Sul de Minas. E-mail: yris.goncalves@alunos.unis.edu.br

<sup>2</sup> Professor Me orientador do Centro Universitário do Sul de Minas. E-mail: Jonathan.nery@professor.unis.edu.br

# **1 INTRODUÇÃO**

Com o avanço tecnológico industrial e a origem das indústrias 4.0, as empresas vêm buscando seu desenvolvimento para permanecerem competitivas no mercado. Isso faz com que se busque a maximização da produtividade e a eficiência na fabricação industrial, sem perder a qualidade do produto. Neste contexto a manutenção dentro das indústrias passou por diversas mudanças devido ao aumento da cobrança pela maximização da confiabilidade e disponibilidade das máquinas e a redução de custo (HAROLDO,2014).

A partir da evolução pensamento gerencial das empresas, novas técnicas foram desenvolvidas no setor de manutenção, dentre elas a manutenção preditiva, que tem como objetivo minimizar ou evitar a queda no desempenho, seguindo um plano previamente elaborado, baseada nos intervalos definidos de tempos em tempos, sempre visando prolongar a vida útil das máquinas e equipamentos. Garantindo assim o aumento da eficiência e da produtividade (KARDEC; NASCIF, 2009).

Com a crescente automação dos processos e a necessidade de monitoramento das condições operacionais dos equipamentos, a implementação do aprendizado de máquina torna-se uma ótima opção, uma vez que apresenta alta capacidade de resolver problemas difíceis de serem resolvidos através de modelagem matemática simples, auxiliando também na tomada de decisões. (GARTNER, 2018)

A aplicação de um sistema de aprendizado de máquina no processo de peneiramento se faz necessária, pois as peneiras vibratórias são equipamentos críticos, devido ao carregamento e as condições de operação, ocasionando grande ocorrência de falhas prematuras e quebra, gerando paradas no processo produtivo, interferindo na produtividade da empresa.

O presente trabalho tem como objetivo estudar a aplicação da técnica de aprendizado de máquina à análise de vibração das peneiras vibratórias, tendo como meta a redução do tempo de resposta para os defeitos vibracionais presentes nos equipamentos e conseqüentemente na minimização das falhas, aumentando assim a confiabilidade e disponibilidade das peneiras.

A inexistência de pesquisas acadêmicas a respeito do peneiramento de grãos e os elevados números de falhas existentes neste processo, principalmente na indústria cafeeira, viabilizaram a elaboração de um projeto de pesquisa no tema apresentado. Desta maneira, esperamos contribuir com melhorias que irão auxiliar na redução de paradas e redução de custo na atividade de peneiramento. Além disso, as conclusões desta pesquisa podem servir de base para outros estudos as áreas da engenharia.

A metodologia utilizada foi a de pesquisa bibliográfica e análise preliminar sobre o tema. Seguido pela metodologia de pesquisa qualitativa, de caráter exploratório, o que viabilizará as análises que serão realizadas ao longo do trabalho.

O trabalho foi dividido em referencial teórico onde são apresentados os conceitos da manutenção preditiva e da análise de vibração. Seguido da aplicação das ferramentas, resultados e discussão onde foram apresentadas todas as etapas de implementação e a conclusão que traz a análise de viabilidade.

## **2 REFERENCIAL TEÓRICO**

### **2.1 Fundamentos do peneiramento**

Entende-se como peneiramento, o processo de separação de partículas, classificando-as em duas ou mais classes de dimensões distintas, por meio de superfícies uniformemente perfuradas, a classificação dos tamanhos executada a partir de um gabarito, onde as partículas terão duas possibilidades, passarem pela superfície ou ficarem retidas (MILHOMEM, 2013).

Analisando o mecanismo do peneiramento, observamos três ações independentes que são exercidas para que ocorra a peneiração das partículas, primeiramente ocorre o transporte das partículas, em seguida intercorre a estratificação, a partir do movimento vibratório, onde as partículas maiores ficam por cima e as menores por baixo e por fim acontece o peneiramento propriamente dito (CHAVES; PERES, 2010).

## **2.2 Peneiras Vibratórias Horizontais**

São máquinas compostas por uma estrutura robusta, conhecida como caixa de peneira ou caixa vibrante, a qual é apoiada sobre molas, composta de um mecanismo acionado pelo movimento vibratório e de superfícies de peneiramento, podendo variar entre um a três suportes, também conhecidos como “decks” (CHAVES; PERES, 2010).

As peneiras horizontais possuem movimento linear capaz de transportar o material sem o auxílio da aceleração da gravidade. A direção da força que gera o movimento linear geralmente forma um ângulo de 45° com a superfície de peneiramento e a amplitude é dada pela metade do comprimento do trajeto feito pelo seu movimento. Esse tipo de peneira é largamente utilizado em processos de classificação (MILHOMEM, 2013).

## **2.3 Manutenção preditiva**

É a manutenção que permite realizar um diagnóstico a partir das reais condições de funcionamento da máquina, no qual indícios são apresentados quando alguma peça começa a se desgastar ou alguma regulagem é necessária, indicada muitas vezes pelo registro de altas temperatura, vibração, ruídos excessivos. Esse tipo de manutenção é realizado a partir de observações reais da máquina, possibilitando o planejamento a curto prazo para uma intervenção de manutenção para troca de peças e a eliminação do defeito (ALMEIDA, 2016).

O termo relacionado à manutenção preditiva é o de “predizer”. Esse é o objetivo da manutenção preditiva: prever as falhas nos sistemas ou equipamentos, através de acompanhamento dos diversos parâmetros, maximizando o tempo de operação contínua. Ou seja, a manutenção preditiva privilegia a “disponibilidade” à medida que não promove paradas nos equipamentos em operação (BARONI, 2002).

## **2.4 Análise vibracional**

É o processo pelo qual as falhas em máquinas rotativas, são detectadas pela taxa de variação das forças dinâmicas geradas. A análise pode ser realizada através de diversas técnicas que indicam o nível de vibração da máquina pela amplitude do sinal e o componente que apresenta falha a partir das características de frequência (SILVA, 2012).

Todas as máquinas em funcionamento vibram e com o tempo sofrem um processo de degradação, provocado pela modificação da distribuição de energia vibracional do conjunto dos elementos que constituem a máquina. Observando a evolução dos níveis vibracionais é possível detectar diversos defeitos, como, desbalanceamento, desalinhamento, baixa rigidez estrutural, folga mecânica, defeitos em rolamentos, entre outros (SILVA, 2012).

Os parâmetros de vibração associados com máquinas rotativas são geralmente expressos em termos de deslocamento, velocidade e aceleração. Todas as variáveis representam o quanto a máquina está vibrando. A frequência é outro parâmetro importante para a análise, ajudando a examinar sua origem, ou seja, o que está causando tal vibração (RAO, 2016).

#### 2.4.1 Folga rotacional

É o defeito provocado pelo excesso de espaço livre entre os elementos que rotacionais e estruturais de uma máquina. Em geral os espectros característicos de folga apresentam alta amplitude de vibração na frequência fundamental do equipamento e em suas harmônicas. A folga rotacional pode ocorrer a entre rolamento e mancal ou alojamento, assim como entre eixo e rolamento. Com o aumento da folga entre os elementos mecânicos a quantidade de harmônicos e seus níveis vibracionais aumentam, apresentando picos de diferentes amplitudes. E pode ter como causa o desgaste, que faz com que ocorram descontinuidades ou alterações geométricas nos elementos. A folga rotacional pode causar o desalinhamento da máquina, uma vez que a amplitude de vibração em velocidade é amplificada (GOLDMAN, 2000).

#### 2.4.2 Desalinhamento

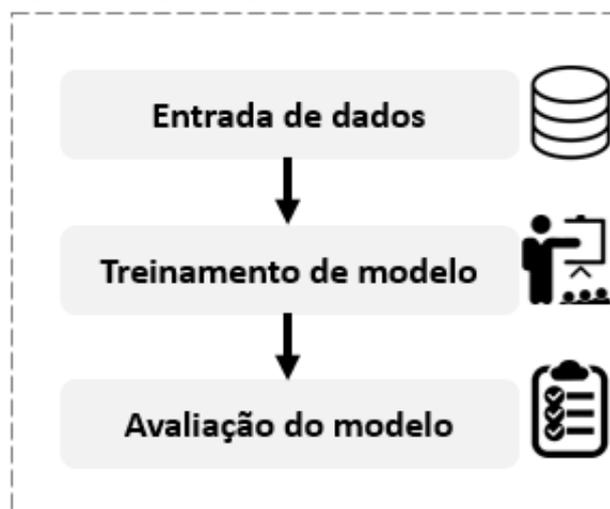
De modo geral o desalinhamento é um defeito muito comum em diversas áreas de operações fabris, este ocorre quando os eixos de rotação de duas máquinas não estão concêntricos, alterando o modo de funcionamento da máquina. As principais causas desse efeito são montagens erradas, folga nos mancais e rolamento, alinhamentos imprecisos e expansões térmicas ignoradas. E os seus principais efeitos são o aumento dos níveis de vibração, principalmente no sentido axial, desgaste dos mancais, desgaste prematuro do acoplamento e aumento do consumo de energia. (BALACHANDRAN; BALAKUMAR; MAGRAB; EDWARD, 2011)

### 2.5 Aprendizado de máquinas

Nos anos recentes, os sistemas de monitoramento de condições de máquinas elétricas vêm se tornando cada vez mais eficientes e sofisticados e grande parte deste avanço está relacionado a aplicação do aprendizado de máquina dentro das empresas. Está pode ser descrita como a técnica que utiliza algoritmos capazes de aprender de acordo com as respostas esperadas por meio associações de diferentes dados, os quais podem ser números, imagens e tudo que possa ser identificado por essa tecnologia. Ao invés de executar as rotinas de software na mão, é aplicado um set específico de instruções para completar uma tarefa em particular, a máquina é “treinada” usando uma quantidade grande de dados e algoritmos que dão e ela a habilidade de aprender como executar a tarefa (MITCHELL, 1997).

Segundo Marsland (2015), o processo geral das técnicas de ML é dividido em 3 etapas como mostra a Figura 01, levando em conta que o processo pode apresentar algumas variações ao logo do seu desenvolvimento.

Figura 01: Etapas do aprendizado de máquina.



Fonte: O Autor.

O aprendizado de máquina é multidisciplinar e trabalha com ideias de diversas áreas, incluindo inteligência artificial, probabilidade e estatística, complexidade computacional, teoria da informação, psicologia, neurociências e filosofia (PAUDYAL; ATIQUÉ; YANG, 2019).

### 3 APLICAÇÃO DAS FERRAMENTAS DE APRENDIZADO DE MÁQUINA

#### 3.1 Preparação dos dados

Como dito anteriormente as peneiras vibratórias são máquinas críticas, que apresentam grande índice de falhas, e algumas delas relacionadas aos seus níveis vibracionais. Dentre os defeitos mais comuns detectados na análise de vibração, destaca-se o desalinhamento e a folga entre os componentes mecânicos, a partir desta informação a análise dos dados tem como foco principal detectar a ocorrência destes dois defeitos.

Os dados para a análise foram coletados das peneiras vibratórias classificadoras de grãos, de uma empresa cafeeira, localizada na cidade de Varginha, Minas gerais. Após a obtenção dos dados, foi executada a extração dos dados em formato tabelado

Tabela 01: Dados para análise

Máquina e ponto	Data	Ix (mm/s)	EF (g)
Mancais\3A	04/06/2020	16.21	0.07
Mancais\3A	04/08/2020	12.68	0.04
Mancais\3A	28/08/2020	11.88	0.13
Mancais\4A	04/06/2020	10.92	0.06
Mancais\4A	04/08/2020	9.60	0.01
Mancais\4A	28/08/2020	12.66	0.07
Mancais\6A	04/06/2020	7.22	0.12
Mancais\6A	04/08/2020	24.50	0.07
Mancais\6A	28/08/2020	4.16	0.15
Mancais\5A	04/06/2020	13.10	0.04
Mancais\5A	04/08/2020	18.94	0.01
Mancais\5A	28/08/2020	6.24	0.06

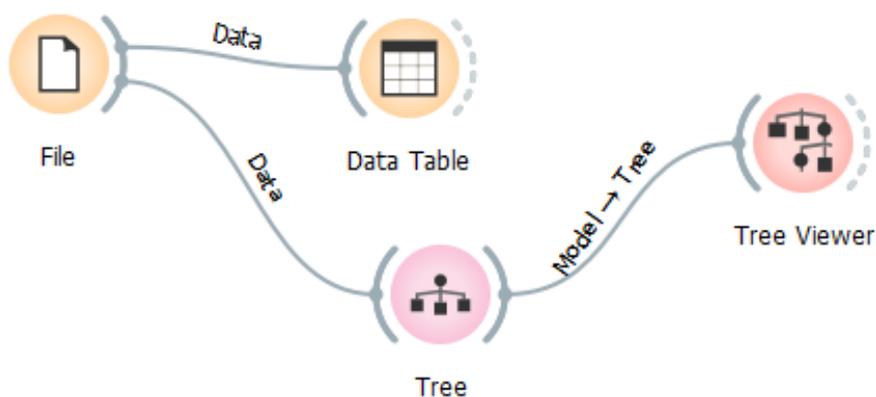
Fonte: O Autor.

Na tabela acima observasse os parâmetros que serão analisados, a vibração na axial, na frequência de rotação das peneiras, 1x, relacionada ao desalinhamento e a demodulação, também na frequência de rotação das peneiras, EF, associada a folga nos equipamentos. Ambos obtidos com a aplicação de um filtro adequado para o equipamento em estudo.

### 3.2 Analise dos dados

A análise dos dados coletados e tratados, foi executada através do pacote de software de aprendizado de máquina, Orange canvas. Dentro deste software temos os widgets, apresentados na Figura 02, que são ferramentas, que permitem desde uma visualização simples de dados, até a avaliação empírica de algoritmos de aprendizagem e modelagem preditiva.

Figura 02: Widgets



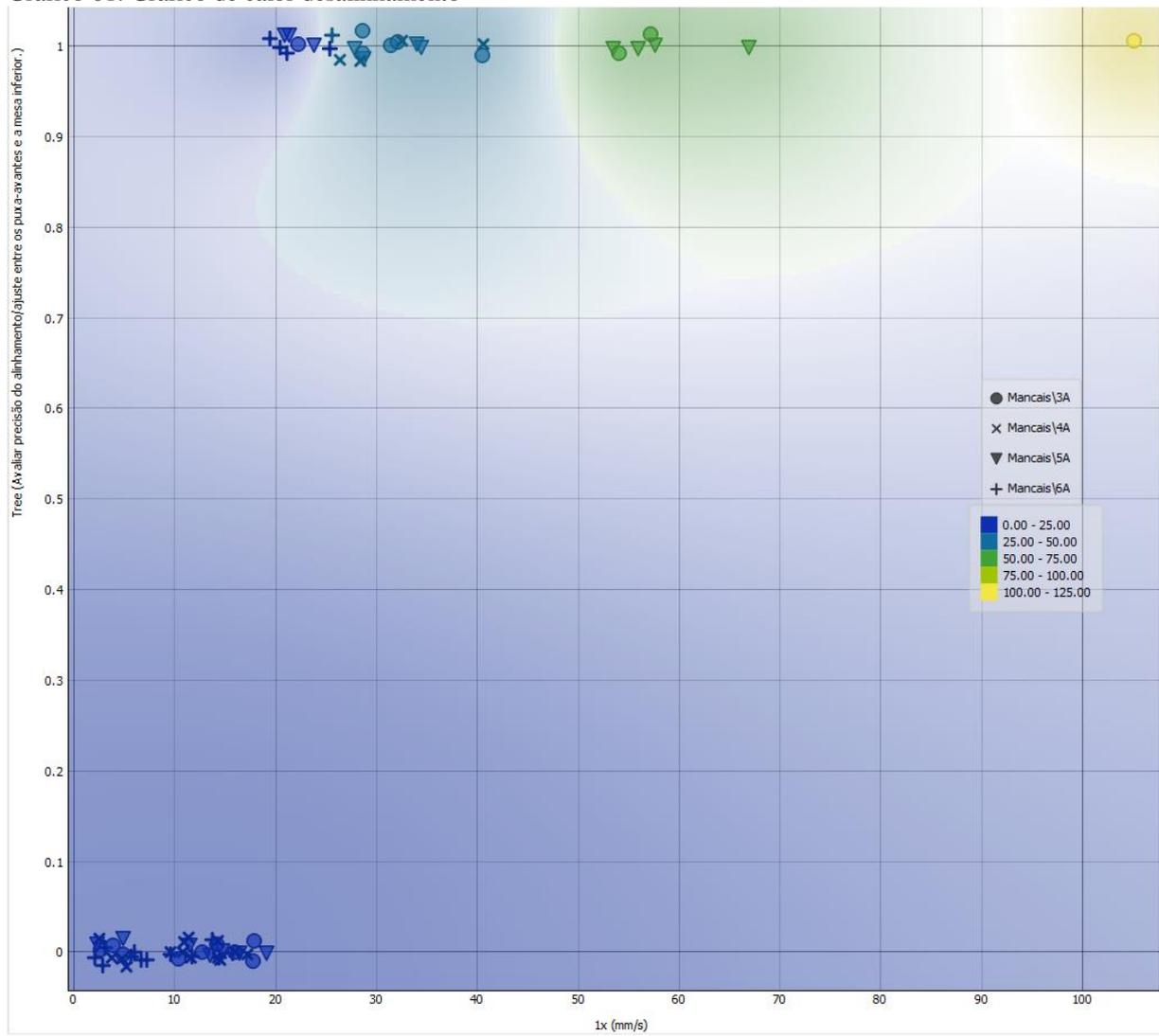
Fonte: O Autor.

A programação dentro deste software ocorre a partir da vinculação de diferente widgets de acordo com as respostas que o usuário deseja obter. Como o objetivo do presente estudo é a identificação de possíveis defeito nas peneiras, foram utilizados widgets mais avançados, capazes de realizar a predição de desalinhamento e folga nos componentes mecânicos.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

A partir das respostas obtidas, foi possível a visualização das condições vibracionais das máquinas e a detecção de falhas. O Gráfico 01, apresenta os pontos onde foram observados níveis de vibração característica de desalinhamento. Sendo o eixo vertical a probabilidade de o equipamento apresentar desalinhamento - quanto mais próximo do número um, maior a probabilidade - e o eixo horizontal a amplitude de vibração, onde sua variação também é demonstrada através das cores, é possível identificar o padrão vibracional das peneiras, quais os pontos mais críticos e quais equipamentos apresentam maior taxa de falhas.

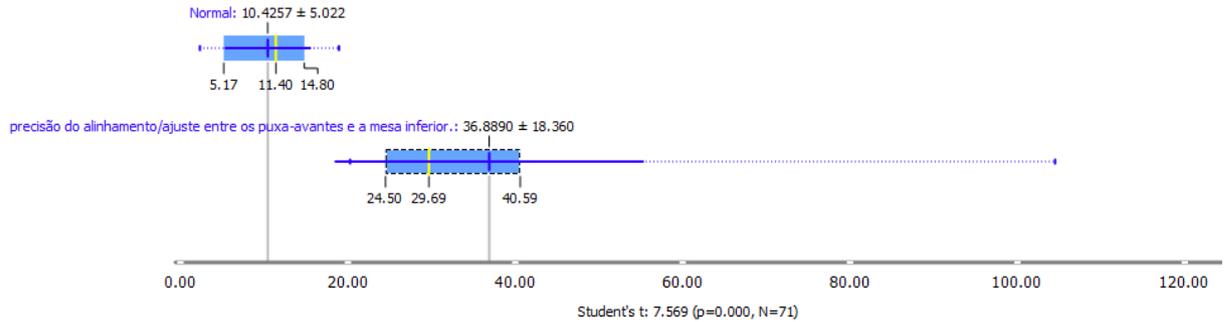
Gráfico 01: Gráfico de calor desalinhamento



Fonte: O Autor.

Para ser considerado normal, a amplitude de vibração do equipamento deve ser de até 19,822 mm/s. Neste caso os mancais ao lado oposto ao motor são os que mais apresentaram defeito de desalinhamento, já que possuem uma amplitude de vibração acima da média obtida através do diagrama de boxplot, como mostra a Figura 03.

Figura 03: Boxplot amplitude de vibração em velocidade

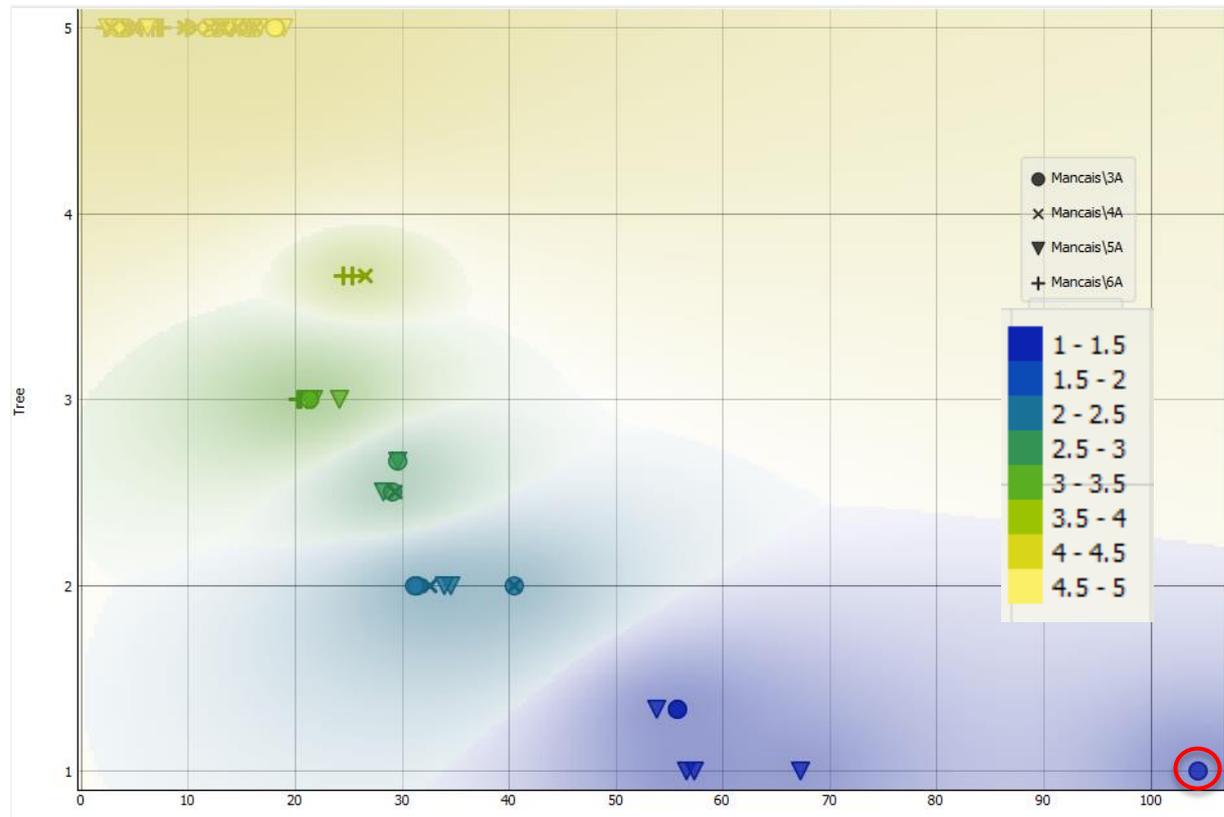


Fonte: O Autor.

Ao ultrapassar o valor de 19,822 mm/s o equipamento é compreendido como defeituoso, e esses são divididos em graus de criticidade de 1 a 5, sendo o número 1 o mais crítico e 5 considerado normal, como demonstrado no Gráfico 2. No eixo vertical apresenta a criticidade e no eixo horizontal a energia de vibração em velocidade na axial.

A partir deste gráfico é possível determinar quais equipamentos necessitam intervenção, priorizando os equipamentos que realmente apresentam grande risco de parada. O ponto mais crítico está assinalado em vermelho, pois a sua criticidade é 1 e sua manutenção deve ser realizada urgentemente, para evitar uma eventual parada no processo produtivo.

Gráfico 02: Gruas de criticidade

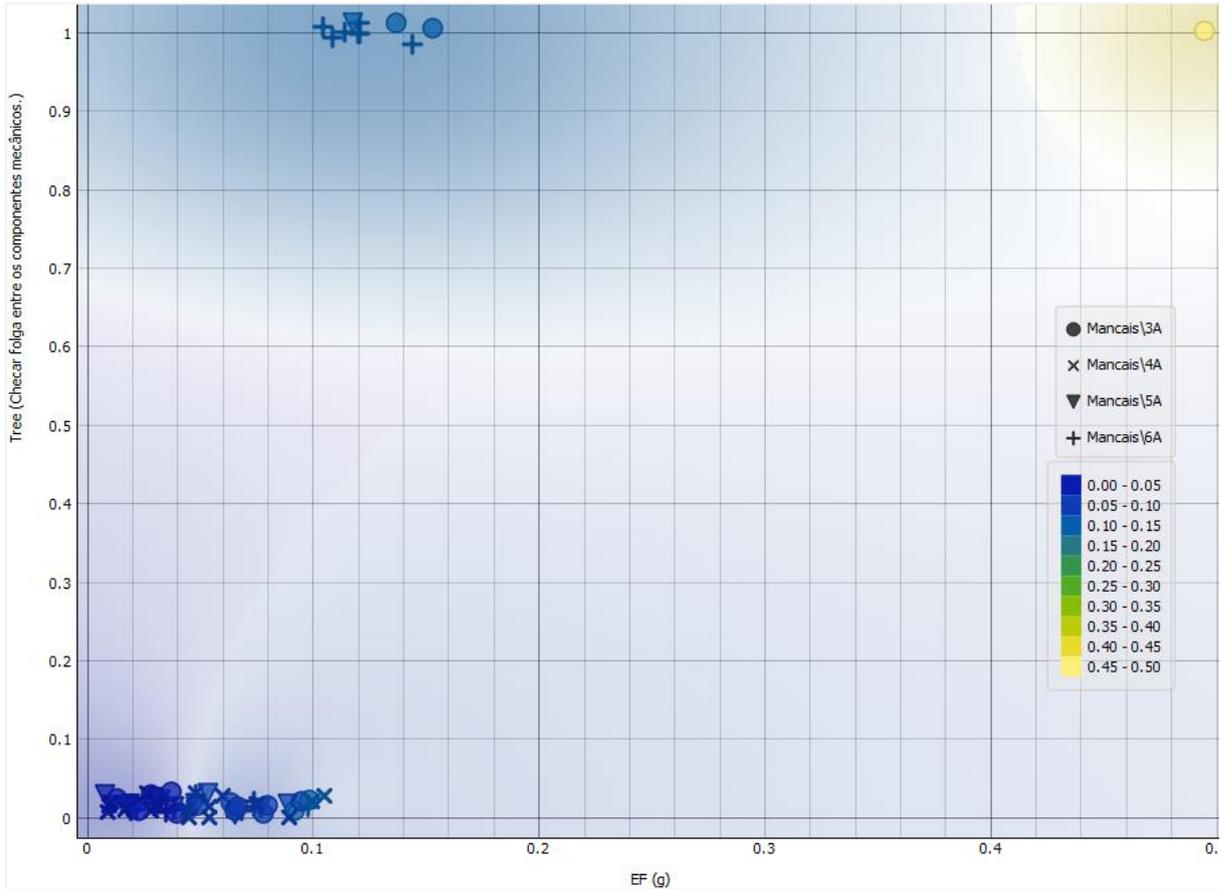


Fonte: O Autor.

Foi aplicado o mesmo método de análise para a identificação de folga mecânica nas peneiras vibratórias. O Gráfico 03 indica os pontos que apresentam esse defeito, onde o eixo

vertical indica a probabilidade de o equipamento apresentar folga e o eixo horizontal representa a amplitude de vibração. Observando o gráfico é possível visualizar uma alta quantidade de ponto na parte inferior, o que significa que grande parte dos pontos coletados possuem baixa amplitude de vibração em demodulação.

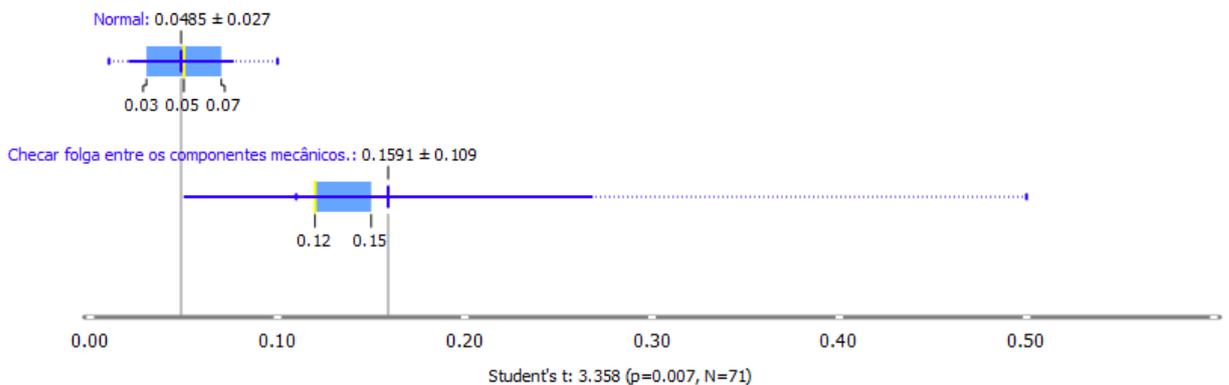
Gráfico 03: Gráfico de calor folga



Fonte: O Autor.

Da mesma forma como realizado para detecção de desalinhamentos, a média de vibração do conjunto foi extraída do diagrama boxplot, Figura 04. Nesta análise, os mancais ao lado oposto ao acoplamento demonstraram uma maior probabilidade de apresentar essa falha.

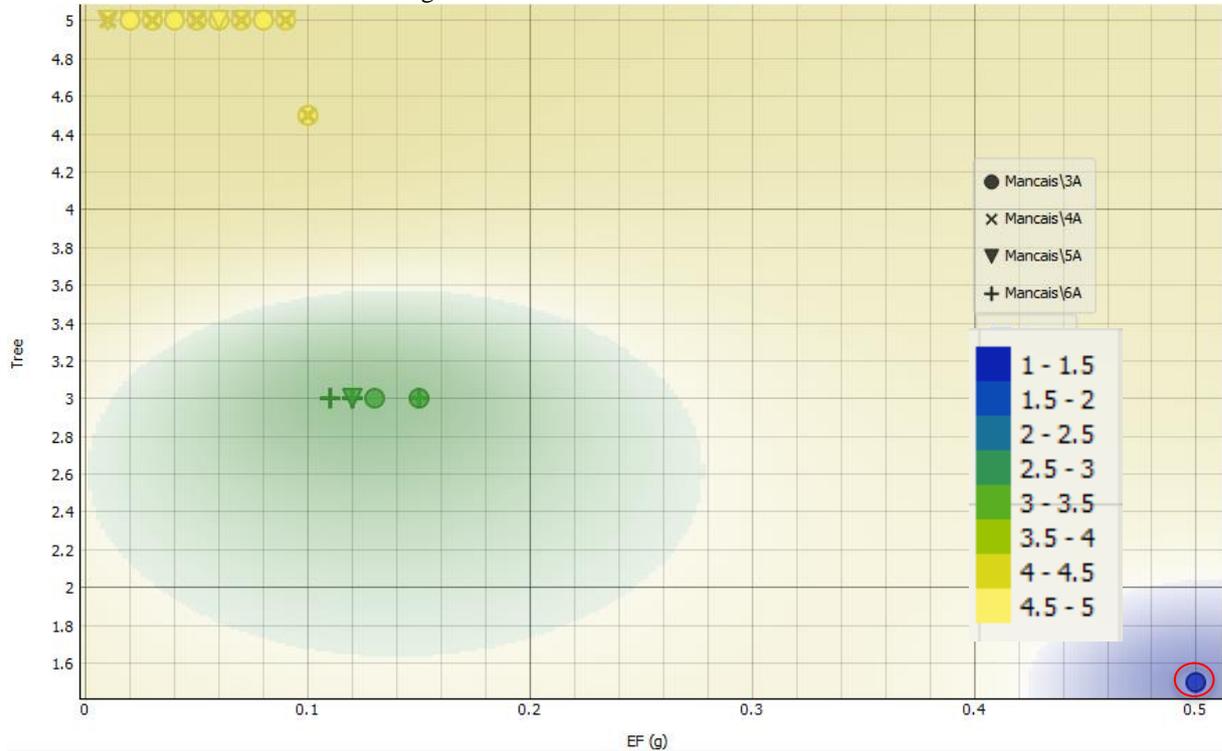
Figura 04: Boxplot da amplitude da demodulação



Fonte: O Autor.

Para ser considerado normal, o equipamento precisaria apresentar uma vibração de até 0,097 g, acima deste valor o equipamento apresenta folga, que também foi dividida em graus de criticidade de 1 a 5, como mostra o Gráfico 4. No eixo vertical representa a criticidade do defeito e no eixo horizontal a amplitude de vibração em demodulação na frequência de rotação da peneira.

Gráfico 04: Gruas de criticidade da folga



Fonte: O Autor.

A ocorrência de folga nas peneiras, é menor, registrando apenas um ponto com alta criticidade, sendo necessário a realização de uma intervenção. Nos demais é viável manter o monitoramento da evolução vibracional

Com a aplicação da aprendizagem de máquina o planejamento da manutenção passa ser realizado a partir criticidade apresentadas através das análises, aumentando a eficácia do plano de manutenção, uma vez que diminui substancialmente o número de paradas não programadas ao longo do processo produtivo, melhorando assim os indicadores de manutenção como a disponibilidade e a confiabilidade com relação as peneiras vibratórias, consequentemente reduzindo os custos com a manutenção.

Esse sistema de análise pode analisar também o histórico de vibração de equipamentos, estabelecendo desta forma o padrão de vibração do equipamento analisado, aumentando ainda mais a qualidade das análises.

## 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Ao longo do trabalho, foram apresentados e desenvolvidos os passos necessários à criação de um sistema de predição de falhas com a aplicação de técnicas de aprendizado de máquina. Desde o tratamento de dados até a saída dos resultados e que proporcionaram um resultado satisfatório.

Os resultados obtidos pelo algoritmo foram bons no que toca a terem conseguido prever falhas, e apresentando uma redução significativa no tempo de obtenção de respostas das

análises. Outro fator positivo identificado, foi a possibilidade de adaptação do sistema de análise sem dificuldades a outras máquinas. E por fim, o projeto não apresenta impedimento monetário a qualquer pessoa que se inspire a criar um sistema similar.

Trabalhos futuros que venham abordar um tema similar podem desenvolver, como sugestão, personalizações dos algoritmos utilizados a nível mais avançados, aplicando outras ferramentas da indústria 4.0, como por exemplo a inteligência artificial, instalação de sensores que enviam dados em tempo real, aumentando assim a confiabilidade das análises geradas e diminuindo ainda mais o tempo de resposta. Também é interessante realizar a aplicação deste modelo a um grande número de máquinas, para validar assim a utilidade do conceito de predição de falhas com aprendizado de máquina na indústria.

## REFERÊNCIAS

ALMEIDA, P. S. D. **Manutenção Mecânica Industrial. Conceitos Básicos e Tecnologia Aplicada**. 1ª. ed. São Paulo: Editora Saraiva, v. 1, 2016.

BALACHANDRAN, BALAKUMAR; MAGRAB, EDWARD B. **Vibrações mecânicas**. São Paulo: Cengage Learning, 2011.

BARONI, Tarcisio. **Gestão estratégica e Técnicas Preditivas**. Rio de Janeiro: Qualitymark, 2002.

CHAVES, A. P.; PERES, A. E. C. **Teoria e prática do tratamento de minérios- Britagem, peneiramento e moagem** 5ª ed. São Paulo: Signus, 2010

DELBONI JR, H. **Modelagem e simulação de circuitos de comunicação e classificação**. Apostila do curso. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, 2012.

FOGLIATTO, F. S.; RIBEIRO, J. L. D. **Confiabilidade e Manutenção Industrial**. Rio de Janeiro: Elsevier, 2011.

FRANÇA, LUIS NOVAIS FERREIRA; SOTELO JUNIOR, JOSÉ. **Introdução às vibrações mecânicas**. 1.ed. São Paulo: Edgard Blucher, 2013.

GARTNER INC. **Gartner's Top 10 Strategic Technology Trends for 2018**. Disponível em: <<https://www.gartner.com/smarterwithgartner/gartner-top-10-strategic-technology-trends-for-2018>> Acesso em: 08 de setembro de 2020.

GOLDMAN, S. **Vibration Spectrum Analysis: a practical approach**. 2ª ed. Nova Iorque: Industrial Press Inc, 2000.

GONÇALVES, R.P. **Estudo numérico do efeito de propriedades mecânicas e do atrito no fenômeno de Shakedown**. 2017. 77 p. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2017.

HAROLDO RIBEIRO, “Manutenção produtiva total: A bíblia do TPM”, PDCA Editora, 1ª edição, São Caetano do Sul, 2014.

JUVINALL, R. C.; MARSHEK, K. M. **Projeto de componentes de máquinas**. 4ªed. Rio de Janeiro: LTC, 2013.

MARSLAND, S. **Machine Learning: An Algorithmic Perspective**. Nova Iorque: Taylor and Francis Group, LLC, 2015.

MELCONIAN, SARKIS. **Elementos de Máquina**. 10ª Ed.rev. – São Paulo:Érica, 2012.

MITCHELL, T. M. **Machine Learning**. - New York: McGraw-Hill, 1997.

MILHOMEM, Felipe de Orquiza. **Modelagem de desaguamento em peneira**. 2013. 148 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mineral, Engenharia de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2013.

MILMAN, M. J. **Equipamentos para pré-processamento de grãos**. 3ªed. Pelotas: UFPel, 2012.

NORTON, ROBERT L. **Projeto de máquinas: uma abordagem integrada**. 4ªed. Porto Alegre: Bookman, 2013.

NUSSENZVEIG, Hersh Moyses. **Curso de Física Básica: mecânica** vol. 1. 5ª. ed. São Paulo: Blucher, 2013.

PAUDYAL, S.; ATIQUE, M. S. A.; YANG, C. X. **Local Maximum Acceleration Based Rotating Machinery Fault Classification Using KNN**. IEEE EIT 2019. Grand Forks: [s.n.]. 2019.

RAO, S. S. **Mechanical Vibrations**. 6ª ed. Upper Saddle River, NJ: Pearson Education, 2016.

SILVA, BRUNA TAVARES . **Bancada para análise de vibração: análise de falhas em máquinas rotativas**. 2012. 71 f. Dissertação (Doutorado) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade de Taubaté - Unitau, Taubaté, 2012