

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO**  
**INSTITUTO DE CIÊNCIAS EXATAS E APLICADAS**  
**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO**  
**CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO**

**AVALIAÇÃO DO IMPACTO DAS VARIÁVEIS DO PROCESSO DE  
COMPRESSÃO NA VIBRAÇÃO DE UM COMPRESSOR CENTRÍFUGO**

**GUILHERME AVELAR DUARTE**

**TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO**

**JOÃO MONLEVADE**

Agosto, 2017



**GUILHERME AVELAR DUARTE**

## **AVALIAÇÃO DO IMPACTO DAS VARIÁVEIS DO PROCESSO DE COMPRESSÃO NA VIBRAÇÃO DE UM COMPRESSOR CENTRÍFUGO**

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao curso de Engenharia de Produção, da Universidade Federal de Ouro Preto – Instituto de Ciências Exatas e Aplicadas, como requisito para obtenção do título de Engenheiro de Produção.

Orientador(a): Luciana de Paula Reis

**JOÃO MONLEVADE**

Agosto, 2017



## ANEXO IV – ATA DE DEFESA

Aos 30 dias do mês de Agosto de 2017, às 17:10 horas, na sala D203 deste instituto, foi realizada a defesa do Trabalho de Conclusão de Curso pelo (a) aluno (a) Guilherme Avelar Duarte, sendo a comissão examinadora constituída pelos professores: Luciana Paula Reis, Thiago Augusto de Oliveira Silva e Maressa Nunes Ribeiro Tavares.

O (a) aluno (a) apresentou o trabalho intitulado: Avaliação do impacto das variáveis do processo de compressão na vibração de um compressor centrífugo. A comissão examinadora deliberou, pela:

Aprovação

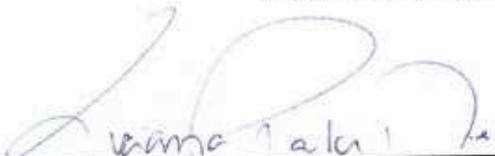
Aprovação com Ressalva - Prazo concedido para as correções:

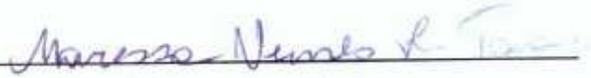
Reprovação com Ressalva - Prazo para marcação da nova banca:

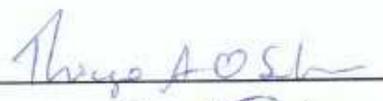
Reprovação

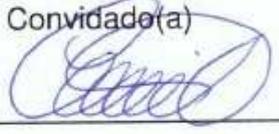
do(a) aluno(a), com a nota 94. Na forma regulamentar e seguindo as determinações da resolução COEP 04/2017 foi lavrada a presente ata que é assinada pelos membros da comissão examinadora e pelo (a) aluno(a).

João Monlevade, 30 de Agosto de 2017.

  
\_\_\_\_\_  
Professor(a) Orientador(a)

  
\_\_\_\_\_  
Convidado(a)

  
\_\_\_\_\_  
Convidado(a)

  
\_\_\_\_\_  
Aluno(a)



## ANEXO IX – TERMO DE RESPONSABILIDADE

O texto do trabalho de conclusão de curso intitulado “AVALIAÇÃO DO IMPACTO DAS VARIÁVEIS DO PROCESSO DE COMPRESSÃO NA VIBRAÇÃO DE UM COMPRESSOR CENTRÍFUGO” é de minha inteira responsabilidade. Declaro que não há utilização indevida de texto, material fotográfico ou qualquer outro material pertencente a terceiros sem o devido referenciamento ou consentimento dos referidos autores.

João Monlevade, 02 de Outubro de 2017.

Guilherme Avelar Duarte



## Sumário

<b>Capítulo 1.</b>	<b>Introdução .....</b>	<b>13</b>
<i>1.1.</i>	<i>Problema de pesquisa .....</i>	<i>13</i>
<i>1.2.</i>	<i>Objetivo geral.....</i>	<i>14</i>
<i>1.3.</i>	<i>Objetivos específicos .....</i>	<i>14</i>
<i>1.4.</i>	<i>Justificativa.....</i>	<i>14</i>
<i>1.5.</i>	<i>Estrutura do trabalho .....</i>	<i>15</i>
<b>Capítulo 2.</b>	<b>Referencial teórico.....</b>	<b>16</b>
<i>2.1.</i>	<i>Gestão da manutenção .....</i>	<i>16</i>
<i>2.2.</i>	<i>Manutenção de compressores centrífugos.....</i>	<i>18</i>
<i>2.3.</i>	<i>Vibração mecânica em compressores centrífugos.....</i>	<i>20</i>
<i>2.4.</i>	<i>Estatística multivariada.....</i>	<i>22</i>
<b>Capítulo 3.</b>	<b>Metodologia de pesquisa .....</b>	<b>26</b>
<i>3.1.</i>	<i>Classificação da pesquisa .....</i>	<i>26</i>
<i>3.2.</i>	<i>Coleta e tratamento de dados .....</i>	<i>27</i>
<b>Capítulo 4.</b>	<b>Caso prático .....</b>	<b>28</b>
<i>4.1.</i>	<i>Particularidades do compressor estudado .....</i>	<i>28</i>
<i>4.2.</i>	<i>Análise do comportamento da vibração.....</i>	<i>29</i>
<i>4.3.</i>	<i>Identificação do ponto crítico .....</i>	<i>33</i>
<i>4.4.</i>	<i>Regressão múltipla .....</i>	<i>35</i>
<i>4.4.1.</i>	<i>Seleção das variáveis preditoras.....</i>	<i>35</i>
<i>4.4.2.</i>	<i>Método stepwise .....</i>	<i>38</i>
<i>4.4.3.</i>	<i>Método best subsets .....</i>	<i>41</i>
<b>Capítulo 5.</b>	<b>Resultados .....</b>	<b>43</b>
<b>Capítulo 6.</b>	<b>Conclusões e sugestões.....</b>	<b>47</b>
<b>Referências</b>	<b>.....</b>	<b>49</b>



## Lista de figuras

<b>Figura 1 - Eixo com impelidores .....</b>	<b>28</b>
<b>Figura 2 - Disposição dos pontos de monitoramento de vibração .....</b>	<b>30</b>
<b>Figura 3 - Comportamento da vibração ao longo do dia.....</b>	<b>31</b>
<b>Figura 4 - Gráficos de vibração do compressor e motor .....</b>	<b>32</b>
<b>Figura 5 - Gráfico de dispersão de vibração no 1STG versus ajustes.....</b>	<b>43</b>
<b>Figura 6 - Dispersão dos resíduos versus valor ajustado .....</b>	<b>44</b>



## Lista de gráficos

<b>Gráfico 1 - Comportamento da vibração no primeiro estágio.....</b>	<b>34</b>
---	-----------



## Lista de quadros

<b>Quadro 1 – Comparação da vibração no compressor .....</b>	<b>33</b>
<b>Quadro 2 - Relação entre variáveis independentes e dependentes.....</b>	<b>37</b>



### Lista de tabelas

<b>Tabela 1 - Tabela de análise descritiva das variáveis preditoras .....</b>	<b>38</b>
<b>Tabela 2 - Resultado do método stepwise para o Período 1 e 2 .....</b>	<b>39</b>
<b>Tabela 3 - Resultado do método stepwise para a amostra completa.....</b>	<b>40</b>
<b>Tabela 4 - Correlação entre as variáveis do modelo .....</b>	<b>41</b>
<b>Tabela 5 - Resultado do método best subsets .....</b>	<b>42</b>
<b>Tabela 6 - MAPE.....</b>	<b>44</b>



### Lista de siglas

FMEA	<i>Failure Mode and Effect Analysis</i>
MAPE	<i>Mean Absolute percentage error</i>
MCC	Manutenção Centrada em Confiabilidade
PLC	Programador Lógico Programável
RMS	<i>Root Mean Square</i>
VIF	<i>Variance Inflation Factor</i>



## Resumo

Uma boa execução do plano de manutenção preventiva é essencial para obter um alto desempenho de máquinas, e conciliado com a manutenção preditiva, é possível monitorar a real condição de trabalho de tais a fim de detectar possíveis falhas em seu estado inicial. Além do senso de cuidado e preservação do setor de manutenção, espera-se que os equipamentos sejam também operados de forma cautelosa para evitar danos em seus componentes, devido a manobras incorretas, permitindo assim gerar menos custos com intervenções prematuras e maximizando o lucro desejado pelas organizações. Sendo assim, a motivação para realização deste estudo partiu da necessidade de avaliar as condições operacionais de um compressor centrífugo que apresenta vibração excessiva, e apesar de não existir sinais de comprometimento da estrutura física da máquina, está trazendo baixo desempenho no processo produtivo. O problema de vibração excessiva é de grande relevância para os setores de manutenção que trabalham focados em confiabilidade e que por meio do desenvolvimento de atividades preventivas, visam obter um melhor desempenho dos ativos de determinada empresa. Buscando auxiliar o setor em um caso específico, este estudo foi realizado por meio de uma abordagem quantitativa utilizando-se de técnicas estatísticas para investigação do problema, dando ênfase a análise de regressão múltipla. Ao final deste foi possível identificar que as variáveis do processo de compressão ligadas a refrigeração e potência do compressor são as principais influenciadoras da vibração, o que permitiu propor melhorias e sugestões para o plano de manutenção da empresa. A técnica estatística utilizada mostrou ser bem útil na previsão do comportamento do processo, mas apesar do resultado positivo encontrado, as análises da equação de regressão múltipla exigem conhecimentos que vão além do conhecimento estatístico, sendo necessário um grande conhecimento teórico e empírico sobre o processo para chegar às conclusões finais.

Palavras-chave: Gestão da manutenção. Compressor. Vibração. Regressão múltipla.



### **Abstract**

Proper execution of the preventive maintenance plan is essential for high machine performance and, in conjunction with predictive maintenance, it is possible to monitor the actual working condition of such machines in order to detect possible failures in their initial state. In addition to the sense of care and preservation of maintenance sector, it is expected that the equipment will also be operated in a cautious way to avoid damage to its components due to incorrect maneuvers, thus allowing to generate less costs with premature interventions and maximizing the profit desired by the organizations. Therefore, a motivation to perform this study, the need to evaluate the operational conditions of a centrifugal compressor that presents excessive vibration, and although there are no signs of compromise of the physical structure of the machine, it is suggested low performance in the production process. The problem of excessive vibration is of great relevance for the maintenance sectors that work focused on reliability and that through the development of preventive activities, aim to obtain a better performance of the assets of a certain company. Seeking to assist the sector in a specific case, this study was carried out through a quantitative approach using statistical techniques to investigate the problem, emphasizing multiple regression analysis. At the end of this it was possible to identify that the variables of the compression process related to refrigeration and power of the compressor are the main influencers of the vibration, which allowed to propose improvements and suggestions for the maintenance plan of the company. The statistical technique used proved to be very useful in predicting the behavior of the process, but despite the positive result found, the analyzes of the multiple regression equation require knowledge that goes beyond statistical knowledge, requiring a great theoretical and empirical knowledge about the process for conclusions.

**Keywords:** Maintenance management. Compressor. Vibration. Multiple regression.



## Capítulo 1. Introdução

Com aplicações diversas, os gases são utilizados largamente no ramo industrial e medicinal, desde a fabricação e beneficiamento do aço à conservação dos alimentos disponíveis para os consumidores nos supermercados. Por sua vez, em quase toda a sua totalidade, os gases são utilizados e comercializados pressurizados, sendo necessário equipamentos específicos para realizar esse trabalho.

Compressores são máquinas capazes de comprimir diversos fluidos gasosos com grande variação de pressão e vazão. Entretanto, esse processo de compressão é uma fonte muito grande de calor e forças dinâmicas contra a estrutura e elementos internos do equipamento, e quando estas não são monitoradas adequadamente, podem levar a degradação do mesmo.

A vibração alta é o principal indício de que os elementos internos de determinado equipamento não estão em perfeitas condições, o que força as equipes de manutenção agirem de forma corretiva para evitar que problemas de maiores magnitudes venham a ocorrer, como a quebra do equipamento.

### 1.1. Problema de pesquisa

Como já mencionado, um dos principais sinais de anormalidades em equipamentos como estes são vibrações excessivas (valores acima dos recomendados pelos fabricantes), dessa forma, escolhendo-se um compressor do tipo centrífugo como objeto de estudo, o presente estudo visa analisá-lo a fim de responder o seguinte questionamento: Quais são as variáveis de processo capazes de impactar na vibração de um compressor centrífugo?

O compressor escolhido para análise está, aproximadamente, a quatro anos em operação (tempo muito inferior ao esperado como vida útil para tal) e já são identificados pontos com vibração excessiva. Devido ao baixo tempo de operação da máquina, descarta-se inicialmente a possibilidade de haver desgastes mecânicos avançados para provocar uma variação grande na vibração. A hipótese inicial é de que existem parâmetros de processo que podem ser ajustados a fim de proporcionar uma maior durabilidade ao compressor.



## **1.2. Objetivo geral**

Identificar as variáveis de processo capazes de impactar na vibração de um compressor centrífugo.

## **1.3. Objetivos específicos**

- a) Analisar o comportamento da vibração em diversos pontos do compressor;
- b) Identificar os pontos de vibração dados como críticos para o equipamento e para o processo;
- c) Identificar quais são as variáveis com potencial de influenciar na vibração do compressor;
- d) Identificar um modelo de análise multivariada que melhor se ajusta aos dados e selecionar as variáveis críticas.

## **1.4. Justificativa**

A abordagem sobre o tema é importante devido a ser um tópico de grande relevância para as indústrias, em particular para os setores de manutenção. A vibração excessiva pode fazer com que os elementos internos de um determinado equipamento venham a se deteriorar prematuramente e danificar outros associados a ele, comprometendo a eficiência operacional da empresa além de altos custos associados com intervenções corretivas.

Outro importante ponto a ser avaliado é a eficiência operacional da empresa do ponto de vista dos clientes. Caso se tenham paradas frequentes por ineficiência do setor de manutenção, a empresa poderá ser vista como não confiável, levando a dificuldades em negociações contratuais para fornecimento de produto ou até mesmo na perda de mercado para empresas concorrentes.

O desenvolvimento deste estudo também é relevante para profissionais que estão se desenvolvendo na área da gestão da manutenção e lidam diretamente com equipamentos semelhantes a este. Apesar de cada equipamento ter configuração operacional e fluido de trabalho diferentes, o conhecimento gerado pode servir de norteamto para investigações de problemas associados a vibração.



### **1.5. Estrutura do trabalho**

Este trabalho foi estruturado em seis capítulos. No segundo capítulo é abordado o referencial teórico onde buscou-se adquirir o conhecimento necessário para melhor entendimento do objeto de estudo (compressor centrífugo), o problema analisado (vibração) e sobre a ferramenta estatística adequada para buscar solucionar o problema identificado. O terceiro capítulo discorre sobre a classificação da pesquisa e os processos utilizados para realizá-la, bem como a coleta de dados e as análises preliminares necessárias para realizar a aplicação das ferramentas estatísticas.

No quarto capítulo são apresentadas as particularidades do compressor estudado e o processo de funcionamento do mesmo, de forma a contextualizar o problema de pesquisa. Será apresentado também os dados coletados e a aplicação das ferramentas estatísticas nestes. No quinto capítulo, serão apresentados os resultados encontrados através dos métodos estatísticos utilizados e confrontando-os com o conhecimento empírico e prático sobre o processo. No sexto capítulo serão apresentadas as conclusões deste estudo e sugestões para trabalhos futuros.



## **Capítulo 2. Referencial teórico**

Um engenheiro de produção focado em melhorias de processo certamente deve se preocupar com as funções de apoio à função produção, sendo que uma das cruciais é a manutenção. Desta forma, este capítulo visa identificar o que é a gestão da manutenção e seus objetivos.

Também será definido o equipamento abordado neste estudo e suas principais características de funcionamento para que posteriormente sejam buscadas as principais práticas adotadas pela manutenção a fim de atingir o cuidado, preservação e a confiabilidade do processo do mesmo.

Como a vibração é o efeito indesejável no equipamento, será apresentado seu conceito, seus efeitos indesejáveis aos equipamentos e os fatores que contribuem para seu surgimento. A estatística foi a área escolhida para identificar e tratar o problema de pesquisa, dessa maneira, foi buscado o método estatístico mais adequado para lidar com o perfil do problema identificado.

### **2.1. Gestão da manutenção**

Manutenção é uma prática que surgiu da necessidade de realizar pequenos reparos em ferramentas e utensílios nos primórdios das civilizações, mas, efetivamente, “foi somente quando da invenção das primeiras máquinas têxteis a vapor, no século XVI, que a função manutenção emerge.” (WYREBSK, 1997, p. 9).

Nesta época, apesar da existência de pessoas responsáveis pela manutenção, estas eram subordinadas à função operação e executavam manutenção corretiva emergencial, o que implicava em conserto após falha e eventual indisponibilidade da máquina (COSTA, 2013). Nos tempos atuais, a manutenção tem procurado novos modos de pensar, técnicos e administrativos, já que as novas exigências de mercado tornaram visíveis as limitações dos recursos nos atuais sistemas de gestão (MOUBRAY, 1996).

Segundo Cabral (2009), a gestão da manutenção é o “conjunto de ações destinadas a encontrar e a situar o nível da manutenção no ponto de equilíbrio entre o benefício e o custo que maximize o contributo positivo da manutenção para a rentabilidade da empresa”. As práticas de manutenção visam então reduzir custos, aumentar a vantagem competitiva e



capacidade operacional efetiva (tanto de máquinas quanto de processos), tendo como foco principal a confiabilidade.

De uma maneira qualitativa, “confiabilidade está associada à operação bem sucedida de um produto ou sistema, na ausência de quebras ou falhas” (FOGLIATTO e RIBEIRO, 2011, p.1). Em uma esfera mais quantitativa, confiabilidade é a medida da capacidade de um produto funcionar corretamente, por um intervalo de tempo em condições pré-determinadas, sendo avaliada como uma probabilidade (BASSETTO, 2007 apud CARTER, 1986). Com uma visão mais técnica, além do aumento da disponibilidade, esta visa atingir também a alta manutenibilidade, segurança dos colaboradores e do ambiente operacional (FUENTES, 2006).

Mas para que a gestão da manutenção seja bem sucedida, ela deve estar também relacionada com a função estratégica da empresa, deve ter por meta o alcance da eficácia nas intervenções e foco nos resultados empresariais (WENDLAND e TAUCHEN, 2010 apud KARDEC e NASCIF, 2006).

Desta forma, os novos gestores e engenheiros de manutenção realizam grandes esforços para desenvolver e fazer cumprir um conjunto de atividades com o propósito de melhorar os padrões de qualidade de administração e execução da manutenção de maneira a se tornarem competentes em pensar além do defeito/falha, e serem capazes de antecipar e eliminar as fontes de problemas. (NASCIF, 2015).

A criação e avaliação dos programas de manutenção preventiva e preditiva se torna uma prática de garantia de qualidade para o setor de manutenção com a finalidade de selecionar tarefas de manutenção que sejam efetivas, que em outras palavras, podem melhorar a disponibilidade, confiabilidade e segurança do sistema (FUENTES, 2006).

Empresas que visam aumentar a confiabilidade investem fortemente em preditivas, para condicionar uma ação de manutenção a um diagnóstico que, com uma dada probabilidade, prediga o momento de uma falha. Este diagnóstico juntamente com uma análise de tendência, é resultado de inspeções, ensaios e monitoramentos contínuos nas variáveis associadas ao modo de falha, como temperaturas, sistemas fechados de lubrificação/refrigeração, e vibrações (SELLITTO; BORCHARDT; ARAÚJO, 2002).



## 2.2. *Manutenção de compressores centrífugos*

Para Nóbrega (2008) apud Rodrigues (1991), “compressores são utilizados para proporcionar a elevação da pressão de um gás ou escoamento gasoso”. O princípio básico de funcionamento de um compressor consiste em captar um fluido (sucção) e elevá-lo a uma pressão mais alta (descarga), sendo que neste processo a temperatura do fluido aumenta e sua massa permanece a mesma. O que difere um compressor de outro é a maneira como ele executa este trabalho de compressão (BLOCH e GEITNER, 2014).

Em relação a compressão, os “compressores podem ser classificados como de deslocamento positivo ou dinâmicos.” (BLOCH e GEITNER, 2014, p. 6). No grupo dos compressores de deslocamento positivo se encontram os compressores de movimento alternativo e no grupo dos compressores dinâmicos se encontram os compressores axiais e centrífugos (turbomáquinas), este último é o objeto de estudo.

Segundo Romualdo (2011 p.34):

Um compressor centrífugo consiste basicamente de um ou mais impelidores radiais montados em um eixo rotativo no interior de uma carcaça. Conectando o fluxo de gás entre os impelidores, estão as partes estacionárias como os difusores e as rodas de pás guias. Cada grupo formado por impelidor, difusor e roda de pás guias constitui um estágio de compressão da máquina.

Os compressores centrífugos são máquinas com grande durabilidade e de fácil manutenção devido a possuir poucos componentes internos. “A sua concepção relativamente simples trouxe como consequência a alta confiabilidade e a elevada relação potência/dimensões” (MECABÔ, 2007, p. 2), mas todos precisam passar por manutenções.

As estratégias de manutenção predominantes podem ser tanto preventivas, através de inspeções sistemáticas, detectando e prevenindo falhas incipientes (SANTOS, 2007), quanto preditivas, acompanhando as variáveis e parâmetros de desempenho de máquinas e equipamentos, visando definir o instante correto da intervenção, com o máximo de aproveitamento do ativo (OTANI e MACHADO, 2008). “Sem um grande esforço e sem um programa de manutenção preventiva implementado, a eficiência da planta e a confiabilidade das operações ficam muito reduzidas.” (BLOCH e GEITNER, 2014, p. 87).



“A manutenção preventiva engloba as inspeções periódicas e a implementação de ações paliativas para evitar falhas inesperadas, perdas de produção ou funções deterioradas dos controles, dos componentes ou da máquina.” (BLOCH e GEITNER, 2014, p. 86). Para manutenções preventivas de grande porte, Mecabô (2007) sugere que se faça no mínimo as seguintes verificações:

- a) Avaliação do estado do impelidor, difusores e planos de junta;
- b) Medição de folgas entre as partes fixas e móveis antes da remoção dos componentes;
- c) Limpeza cuidadosa dos componentes;
- d) Inspeção com líquido penetrante para a pesquisa de eventuais fissuras e controle dimensional e geométrico;
- e) Examinar os mancais e sistemas de selagem quanto a seu estado, folgas, aparência e aderência do metal-patente.

Dentre as práticas de manutenção preditivas mais aceitas na atualidade e que podem ser ditas como essenciais para acompanhar a integridade física de um compressor centrífugo estão: a análise termográfica, análise do óleo de lubrificação e a análise de vibração (NÓBREGA, 2008). Mas o que garante a segurança do compressor é a utilização de instrumentos instalados no equipamento, “que permitem o monitoramento da condição e o desarme automático da máquina antes do comprometimento físico dos seus componentes” (MECABÔ, 2007).

A termografia em sistemas mecânicos monitora e avalia o calor gerado pela fricção e desgaste dos componentes para diagnosticar o estado do equipamento. O aumento da carga sobre os rolamentos, aumento de tensões e forças provenientes do desbalanceamento são algumas das razões de falhas mecânicas e detectáveis através da técnica. (CAMPOS, 2011). O monitoramento é feito por meio de instrumento sem contato, como as câmeras termográficas, mas se torna muito útil a utilização de sensores de contato direto, como os termopares, para realizar o monitoramento contínuo e pontual.

A análise do óleo lubrificante constitui-se num agente de extrema importância na determinação de elementos de desgaste e contaminação dos equipamentos, que por meio dos resultados das análises, é possível conhecer, controlar e até combater a origem da contaminação



(NÓBREGA, 2008). A técnica basicamente avalia a aparência do óleo, teste para água dissolvida, teste de ponto de fulgor, teste de viscosidade, determinação do número ácido total, contagem de partículas metálicas e determinação do conteúdo de aditivos (BLOCH e GEITNER, 2014).

A análise de vibração é uma das técnicas mais utilizada na atualidade, porque se adequa melhor tanto aos equipamentos rotativos como aos alternativos e permite identificar um elevado número de anomalias sem influenciar a disponibilidade das máquinas (PARREIRA, 2009). Parreira (2009) afirma ainda que uma das vantagens da utilização desta técnica como meio de diagnóstico é a capacidade de identificar os defeitos numa fase ainda embrionária, possibilitando intervir no equipamento de forma planejada.

Boas práticas de manutenção consistem em analisar os valores de vibração em diversos pontos da máquina e em periodicidades curtas, normalmente mensais, para ser capaz de identificar falhas em estágios iniciais e ações preventivas/corretivas sejam tomadas. “Todo o evento de manutenção deve ser visto como uma oportunidade para melhoria, de modo a evitar a repetição da falha. Essa sentença é a chave para uma manutenção superior” (BLOCH e GEITNER, 2014, p. 90).

### **2.3. *Vibração mecânica em compressores centrífugos***

Vibrações mecânicas são, em geral, movimentos oscilatórios de uma massa (ou massas) em torno de uma posição de referência. Em uma máquina, vibração é o resultado de forças dinâmicas internas causada por seus elementos rotativos (MARÇAL, 2000). Há casos que a vibração é necessária, mas para o funcionamento de compressores será sempre levado em consideração que a vibração é prejudicial aos equipamentos.

Existem níveis de vibração que são aceitáveis e outros alarmantes, devido ao fato desta ter potencial para levar à quebra do equipamento. O papel do setor de manutenção é encontrar as causas que levam à vibração para que posteriormente sejam tomadas ações corretivas. Segundo França e Sotelo Júnior (2013, p. 2):

Se não for possível eliminar totalmente a vibração nesses casos, deve-se ao menos tentar mantê-la sob controle e, com auxílio de planejamento e programação da manutenção apropriados, antecipar a substituição de componentes mecânicos antes que as avarias ocorram.



O que as equipes de manutenção vêm realizando nas grandes indústrias atualmente é investir grande esforço na detecção da fonte do problema e tratá-lo da maneira adequada para mitigar os efeitos indesejáveis da vibração. Segundo Parreira (2009, p. 17):

As principais causas de vibração em máquinas são desequilíbrios, desalinhamentos, desapertos, defeitos em rolamentos, defeitos em acoplamentos, defeitos em transmissões, desgastes/excentricidades em engrenagens, forças aerodinâmicas e hidrodinâmicas, forças eletromagnéticas, aperto/fixação deficiente, atrito ou ressonância.

A manutenção preditiva de análise de vibração é responsável por monitorar e identificar as principais falhas de máquinas. Para tal, “é necessário utilizar técnicas de processamento do sinal vibratório com o objetivo de extrair as informações que permitam correlacionar algumas características do sinal com o estado do equipamento.” (LAGO, 2007).

Os sensores responsáveis por captar a vibração são os acelerômetros. “O Sensor de vibração é um dispositivo mecatrônico capaz de transformar o movimento associado ao processo vibratório em um sinal de vibração, permitindo desta forma a sua medição, monitoração e análise.” (HOLANDA, 2016, p. 26). “O sinal assim obtido é chamado espectro de frequência, que é uma representação gráfica do movimento vibratório. É apresentado em um diagrama que possui a frequência como abscissa e a amplitude como ordenada.” (HOLANDA, 2016, p. 28).

Os sensores de proximidade também são utilizados com muita frequência para monitoramento da vibração. Estes “consistem de uma sonda ou dispositivo físico que gera um campo eletromagnético e um circuito condicionador que gera uma tensão elétrica proporcional à distância entre a ponta da sonda e o elemento alvo.” (SILVA, 2013, p. 40).

Estes fornecem leituras durante todo o tempo de operação do equipamento. O sistema é constituído de um sensor de proximidade, cabo e um desmodulador de sinal que comunica com um PLC (Controlador Lógico Programável) para monitorar a vibração do equipamento (FELÍCIO, 2015).



Os parâmetros para mensuração dos níveis de vibração são usualmente expressos em termos de deslocamento (mils<sup>1</sup>), velocidade (mm/seg) e aceleração (g<sup>2</sup>) (HOLANDA, 2016, p. 21). Já os níveis de vibração em um espectro são medidos a partir dos valores de Pico a Pico, valor de Pico e valor médio quadrático (RMS – Root Mean Square).

O valor de Pico é o maior valor atingido por uma forma de onda, não sendo muito eficiente para interpretação devido a não levar em consideração todo o tempo de leitura da onda. O valor de Pico a Pico indica o percurso máximo percorrido por uma partícula sujeita a vibração, ou seja, é a soma do módulo da maior amplitude positiva com a negativa em um intervalo de tempo (HOLANDA, 2016).

O RMS “tem sido escolhido como unidade de medida para indicar a severidade da vibração. .Em geral, o uso da severidade de vibração como critério fornece uma avaliação relativamente confiável necessitando somente de medições simples.” (GÁRCIA, 2005, p. 17). É o parâmetro de leitura mais utilizado para avaliar os níveis de vibração, por levar em consideração todo o histórico no tempo da onda e dá um valor diretamente relacionado à energia contida na mesma, e portanto, à capacidade destrutiva da vibração (HOLANDA, 2016).

“É importante ter em mente que o objetivo de se utilizar verificações de vibração é detectar problemas em seus estágios iniciais e programar os procedimentos corretivos apropriados.” (BLOCH e GEITNER, 2014, p. 47).

#### **2.4. Estatística multivariada**

A fim de alcançar o objetivo geral proposto, deve ser investigado como é a correlação da variável vibração com as demais variáveis do processo e tentar identificar um modelo que melhor se adeque ao comportamento destas. Sendo assim, o objetivo principal da análise multivariada que será aplicada neste estudo consiste em descrever e identificar esta relação de forma a entender o processo.

---

<sup>1</sup> 1 mils = 0,001”.  
<sup>2</sup> g = 9,8065 m/s<sup>2</sup>.



A princípio, a análise multivariada pode ser entendida como uma análise simultânea de duas ou mais variáveis em investigação no indivíduo ou objeto. Segundo Hair *et al.* (2009, p. 23):

Porém, para ser considerada verdadeiramente multivariada, todas as variáveis devem ser aleatórias e inter-relacionadas de tal maneira que seus diferentes efeitos não podem ser significativamente interpretados em separado.

Para selecionar a técnica multivariada adequada ao estudo, Hair *et al.* (2009) sugere que o pesquisador responda a três julgamentos sobre o objetivo da pesquisa e a natureza dos dados:

1. As variáveis podem ser divididas em classificações independentes e dependentes com base em alguma teoria?
2. Se podem, quantas variáveis são tratadas como dependentes em uma única análise?
3. Como as variáveis, sejam dependentes ou independentes, são medidas?

Segundo Hair *et al.* (2009, p. 33) “regressão múltipla é o método de análise apropriado quando o problema de pesquisa envolve uma única variável dependente métrica considerada como relacionada a duas ou mais variáveis independentes métricas.”

“O objetivo principal da análise de regressão é o de descrever a relação entre as variáveis e estimar ou prever os valores da variável resposta para valores, por vezes não observados, das variáveis explicativas.” (FARIA, 2006, p. 63).

O modelo de regressão linear pode ser expresso pela fórmula:

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \dots + \beta_n X_n + \varepsilon \quad (1)$$

Onde  $Y$  é a variável dependente em função do produto das variáveis independentes  $X_1, X_2, \dots, X_n$  e o coeficiente correspondente  $\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_n$ .  $\beta_0$  é a constante da equação. O termo  $\varepsilon$  representa o erro atribuído ao modelo de regressão, pois não há regressão perfeita (SAMOHYL, 2009).

Dois são os métodos mais comuns para encontrar um modelo de regressão múltipla, o método *Stepwise Regression* (regressão “passo-a-passo”) e o *Best Subsets Regression* (Regressão de Melhores Subconjuntos). “O método *Stepwise* utiliza todas as variáveis pré-



definidas e de forma gradativa exclui ou inclui variáveis ao modelo, conforme sua significância estatística.” (REIS; COUTO; FERNANDES, 2015, p.5). Para Oliveira (2010, p. 159)

O método “*Best Subset*” é usado para ajudar a determinar quais variáveis preditoras (independente) devem ser incluídas no modelo de regressão múltipla. Este método envolve a análise de todos os modelos criados a partir de todas combinações possíveis de variáveis preditoras.

A maioria dos *softwares* que trabalham com o método *Stepwise* fornecem as seguintes informações para cada variável independente observada: os coeficientes que farão parte da equação de regressão, o valor-p e os fatores de inflação da variância (VIF). São também fornecidos os valores do  $R^2$ ,  $R^2$ -ajustado para o modelo encontrado, onde estes medem o quanto à variabilidade total dos dados é explicada pelo modelo de regressão (TOMÉ, 2007).

O valor-p é “o nível exato de significância de um teste estatístico; isto é, a probabilidade de obter um valor da estatística de teste que seja no mínimo tão extremo quanto aquele observado quando a hipótese nula é verdadeira”. (MONTGOMERY e RUNGER, 2003, p. 489). Em outras palavras, ao nível de significância de 95%, ou um p-valor inferior a 0,05, existem evidências estatísticas que comprovam a associação da variável observada com a variável de resposta.

O VIF mede o grau em que cada variável independente é explicada pelas demais variáveis. Este indicador é uma referência para analisar se existe a presença de multicolinearidade entre as variáveis independentes. “A multicolinearidade ocorre quando qualquer variável independente é altamente correlacionada com um conjunto de outras variáveis independentes” (Hair *et al.*, 2009, p. 133), ou seja, uma variável independente é perfeitamente prevista por outras variáveis independentes.

“Quando a multicolinearidade aumenta, a habilidade de definir qualquer efeito da variável diminui.” (Hair *et al.*, 2009, p. 22). Variáveis com alto nível de multicolinearidade devem ser excluídas do modelo, entretanto, essa exclusão implica em perda de informação. O que deve ser avaliado com cautela é o quão a ausência desta irá impactar no modelo final.

Quanto maior for o fator de VIF maior será a multicolinearidade. (MILOCA e CONEJO, 2011). Segundo Hair *et al.* (2009), valores de VIF próximos de 1, não afetam a interpretação



dos coeficientes da variável estatística de regressão, e para valores maiores que 10, terão efeitos nos coeficientes de regressão.

Utilizando-se o método *Best Subset*, os modelos de regressão encontrados podem ser comparados utilizando as estatísticas  $R^2$ ,  $R^2$ -ajustado,  $C_p$  de Mallows e  $S$  (raiz quadrada da menor média quadrada do erro). O  $C_p$  de Mallows compara a precisão e o vício do modelo completo a modelos de um subconjunto e “[...] deve ser o mais próximo do número de variáveis regressoras no modelo”. (COLET *et al.*, 2007, p. 996). O  $S$  representa os valores da distância padrão dos dados até a linha de regressão, ou seja, quanto menor o valor de  $S$ , melhor o modelo prediz a resposta.

Além das análises estatísticas fornecidas pelos dois métodos, outra forma de verificar se o modelo de regressão teve um resultado satisfatório pode ser obtido através da análise do erro percentual absoluto médio (MAPE – *Mean absolute percentage error*). Esta ferramenta possui uma fácil interpretação e permite avaliar a precisão nas previsões, sendo que, quanto menor o valor deste indicador, mais próximo o modelo estará ajustado aos valores reais.

Para Lewis (1997), o MAPE é considerado como uma das medidas de erro mais usadas para se avaliar os métodos de previsão. O erro percentual absoluto médio pode ser calculado mediante a utilização da equação 2.

$$MAPE = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{|y_i - x_i|}{y_i}}{n} \times 100 \quad (2)$$

Onde  $n$  é o número de observações,  $y_i$  é o valor real da variável observada e  $x_i$  é o valor previsto.



## Capítulo 3. Metodologia de pesquisa

### 3.1. Classificação da pesquisa

A investigação do problema baseou-se na mensuração das variáveis de determinado processo por meio de dados quantificáveis, para posterior aplicação de técnicas estatísticas. Assim, “o método estatístico passa a se caracterizar por razoável grau de precisão, o que o torna bastante aceito por parte dos pesquisadores com preocupações de ordem quantitativa.” (GIL, 2008, p.17).

Este estudo é de natureza aplicada, pois, segundo Kauark, Manhães e Medeiros (2010), a pesquisa aplicada objetiva gerar conhecimentos para aplicação prática, dirigida à solução de problemas específicos. Seguindo essa linha de raciocínio, espera-se gerar conhecimento suficiente para amenizar ou solucionar um problema real enfrentado por equipes de manutenção.

A pesquisa realizada tem objetivo explicativo, uma vez que Turrioni e Mello (2011, p.81) afirmam que a “pesquisa explicativa visa identificar os fatores que determinam ou contribuem para a ocorrência dos fenômenos. Aprofunda o conhecimento da realidade porque explica a razão, o ‘porquê’ das coisas.” Como já mencionado no objetivo geral deste, o foco está em encontrar os motivos que levam ao aumento da vibração do compressor.

Segundo Prodanov e Freitas (2013, p.53):

A maioria das pesquisas explicativas utiliza o método experimental, que possibilita a manipulação e o controle das variáveis, no intuito de identificar qual a variável independente que determina a causa da variável dependente, ou o fenômeno em estudo.

Para GIL (2008, p.51), “a pesquisa experimental consiste em determinar um objeto de estudo, selecionar as variáveis que seriam capazes de influenciá-lo, definir as formas de controle e de observação dos efeitos que a variável produz no objeto.” Desta forma, o ideal para este estudo seria aplicar os resultados das análises de dados no processo em questão a fim de assegurar que os resultados encontrados sejam satisfatórios. Entretanto, algumas variáveis dependem de intervenções físicas ou “reparos” para serem modificadas, enquanto outras, podem ser alteradas por meio de comandos/ajustes manuais em válvulas, mas todas podem comprometer a produtividade e dependem de aprovações gerenciais para tais, o que



impossibilita os testes práticos sem uma avaliação e aprovação do setor de engenharia da empresa.

### 3.2. *Coleta e tratamento de dados*

Os dados coletados foram adquiridos por meio de um *software* do acervo da empresa que realiza uma extração de informações de um PLC disponibilizando-as em uma planilha de Excel. As informações contidas no PLC são provenientes de transmissores eletrônicos situados no equipamento observado, que os quais fornecem informações em intervalos de tempo superiores a um segundo.

Quanto ao nível de qualidade e precisão das informações coletadas, pode-se dizer que são confiáveis, dado que todos os instrumentos de leitura eletrônica do processo passam por um processo de calibração e aferição periódica conforme política de manutenção da empresa. Tal atividade de rotina de calibração visa garantir a confiabilidade no monitoramento do processo.

Por possuir uma interface amigável e de fácil acesso, o *software* utilizado para realizar os testes estatísticos foi o Minitab 18. Este possui uma grande variedade de testes que podem ser aplicados na amostra a fim de auxiliar no desenvolvimento do estudo. O primeiro método utilizado foi o *Stepwise*, para identificar as variáveis estatisticamente importantes para o entendimento do processo investigado. Posteriormente a este, foi utilizado o método *Best Subsets*, para identificar entre vários modelos o que melhor representa o comportamento do processo.

## Capítulo 4. Caso prático

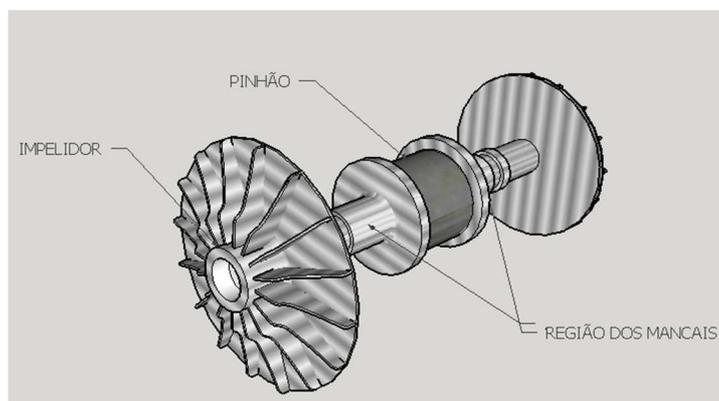
### 4.1. Particularidades do compressor estudado

O compressor centrífugo estudado comprime nitrogênio por meio de quatro estágios de compressão, em um processo sequencial e contínuo, produzindo um gás pressurizado a aproximadamente  $16,98\text{barg}^3$  e uma vazão de  $11.600\text{Nm}^3/\text{h}$ . Esse equipamento em particular possui três eixos, sendo dois deles secundários e um eixo principal responsável por transmitir o movimento aos demais eixos a partir da rotação de um motor elétrico de 2.500HP.

O eixo principal é composto de uma engrenagem principal (*bull gear*) no seu centro com uma rotação nominal de 3.565RPM. O eixo secundário é um pinhão dotado de dois impelidores, um em cada extremidade (Figura 1). A função do *bull gear* é multiplicar a rotação para o pinhão de cada eixo secundário.

O compressor possui quatro impelidores de tamanhos diferentes, sendo cada um responsável por realizar o trabalho de compressão em um estágio diferente. Os impelidores do primeiro eixo secundário correspondem ao primeiro estágio (1STG) e segundo estágio (2STG) de compressão, trabalhando com uma rotação de 24.142RPM. Os do segundo eixo secundário, correspondem ao terceiro estágio (3STG) e quarto estágio (4STG) de vibração, com uma rotação aproximada de 39.317RPM.

Figura 1 - Eixo com impelidores



Fonte: Elaborada pelo autor

<sup>3</sup> A unidade barg se refere a pressão manométrica. O equipamento irá fornecer uma pressão diferencial teórica referenciada na pressão atmosférica.



Tomando como exemplo o estágio de menor rotação, temos que no intervalo de um segundo, o impelidor gira em seu próprio eixo aproximadamente 400 vezes. Para compreender a dimensão que a vibração excessiva pode alcançar, se este mesmo componente “vibrar/deslocar” suficientemente a ponto de tocar em uma região estática devido as pequenas folgas internas, certamente a máquina irá quebrar, gerando custos elevados com peças de reposição, custos com mão de obra especializada para realizar os reparos e indisponibilidade operacional.

Para a máquina operar é necessário que ela possua um sistema de lubrificação eficiente para lubrificar e reduzir o atrito gerado no contato dos dentes das engrenagens e criar um filme de óleo entre o eixo e o mancal. Como componentes internos, além dos impelidores, o equipamento possui em cada eixo dois mancais de deslizamento (também para o eixo do motor) para promover uma rotação com o mínimo de atrito possível.

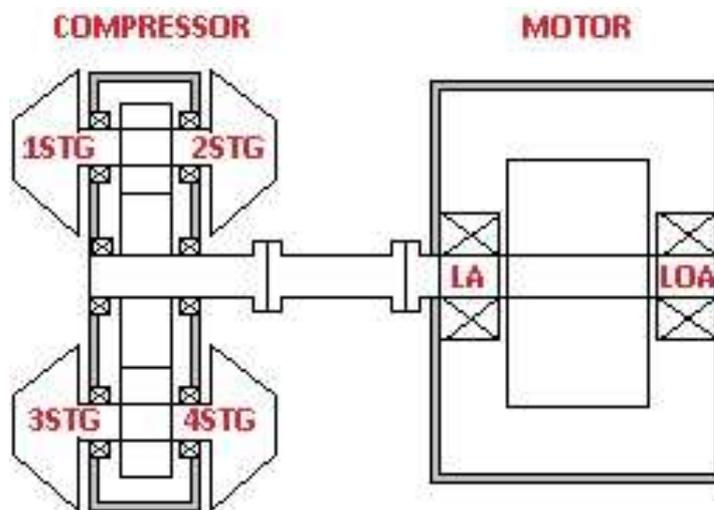
Como já mencionado, o processo de compressão é uma grande fonte de calor, portanto, são necessários equipamentos para fazer o trabalho de resfriamento dos fluidos de trabalho. São utilizados neste equipamento cinco trocadores de calor resfriados com água industrial, sendo um para resfriar o óleo de lubrificação e outros quatro para resfriar o nitrogênio após cada estágio de compressão.

#### **4.2. *Análise do comportamento da vibração***

Após o entendimento de como é o processo de compressão, verificou-se que a vibração é rigorosamente monitorada em seis pontos específicos da máquina (Figura 2): o mancal do lado oposto ao acoplado ao motor (LOA), do lado acoplado ao motor (LOA) e os quatro mancais associados a cada estágio de compressão.

A vibração monitorada próximo aos mancais do motor é necessária para acompanhar o desempenho deste individualmente e verificar se ele não está transmitindo vibração excessiva para o compressor. Os quatro pontos restantes nas câmaras de compressão, são monitorados devido às pequenas tolerâncias de folga entre as partes móveis e as grandes rotações de trabalho em cada um deles. Em todos estes pontos, a vibração é monitorada por meio de sensores de proximidade.

Figura 2 - Disposição dos pontos de monitoramento de vibração



Fonte: Elaborada pelo autor

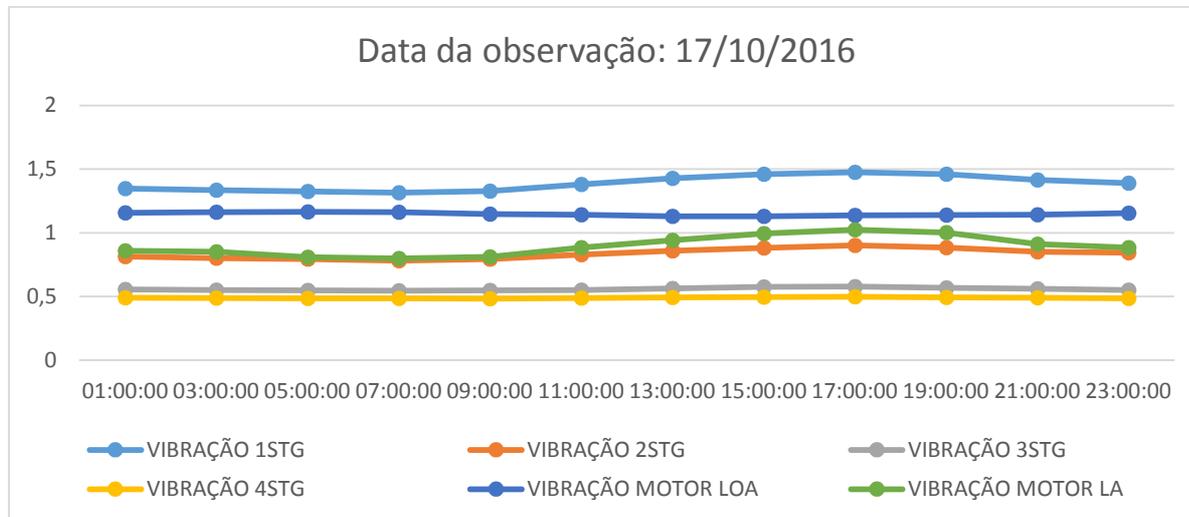
Os dados coletados para realizar a análise do processo correspondem a um período de dois anos (18/10/2014 a 17/10/2016), tendo duas horas de intervalo entre uma leitura e outra, totalizando em 8.771 leituras individuais para 32 variáveis escolhidas inicialmente. Devido ao grande número de informações, foi necessário realizar uma “filtragem nos dados” com embasamento empírico sobre o processo, de modo a obter uma amostra que melhor representasse a situação da máquina nas condições reais de trabalho.

O filtro ficou responsável por analisar em quais momentos a máquina estava em plena capacidade de produção. Ocorreram situações onde o compressor estava com pouca carga de trabalho (fora do valor nominal de vazão) e outras em que a máquina estava parada para manutenção ou pela falta de demanda do cliente. Após a realização deste filtro a amostra do processo teve 8005 leituras.

Em uma segunda análise nos dados foi observado que os níveis de vibração possuem um comportamento cíclico durante o dia (Figura 3) e com certa repetibilidade quando comparada aos demais dias avaliados. Desta forma, a amostra à ser trabalhada foi referente apenas ao intervalo diário de 16:00 às 18:00 horas, onde este apresenta um pico no valor da vibração nos pontos dos mancais. Esta nova amostra possui 627 leituras.



Figura 3 - Comportamento da vibração ao longo do dia



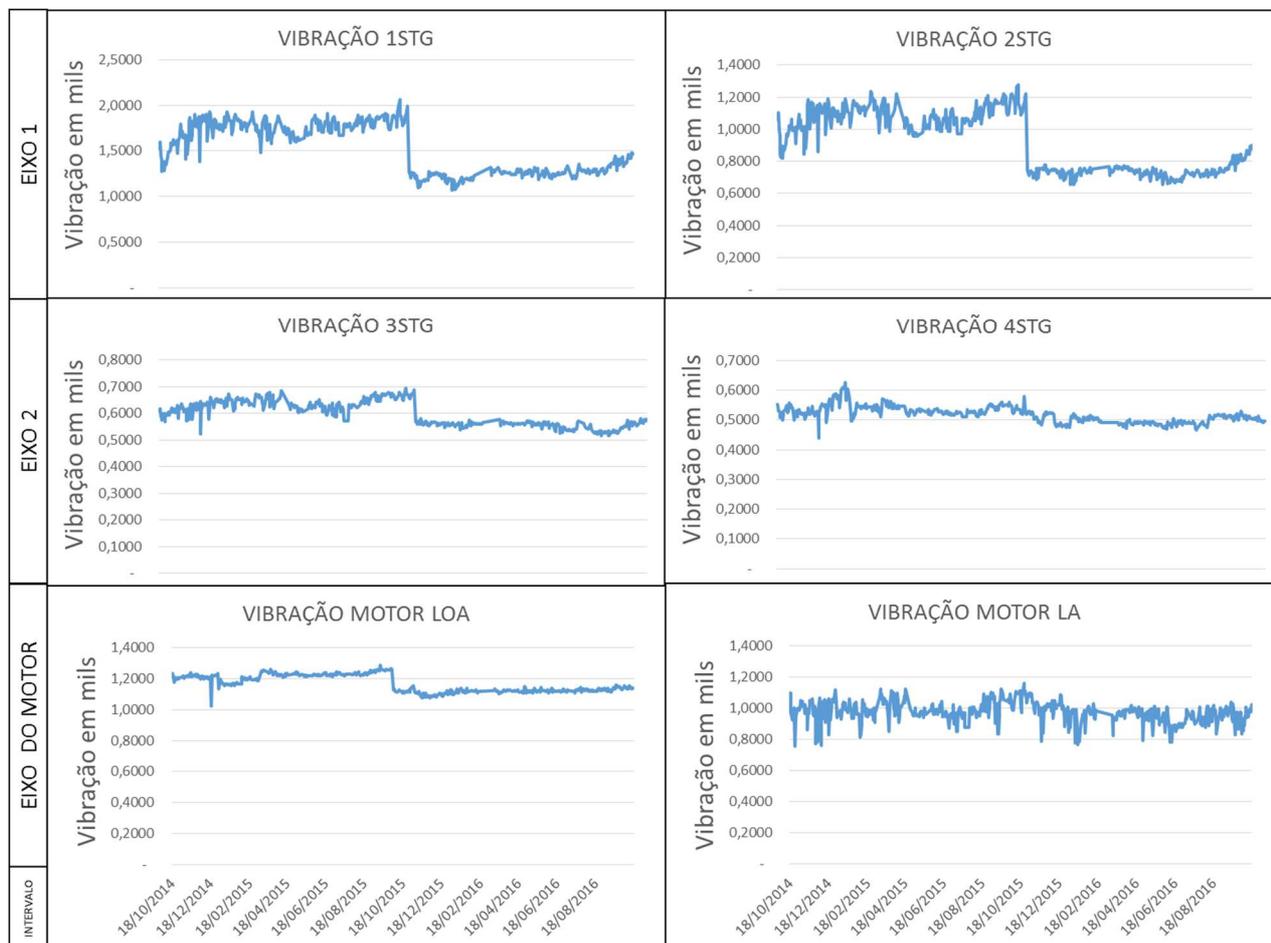
Fonte: Elaborada pelo autor

A Figura 4 mostra a evolução da vibração em cada ponto de leitura do compressor durante o período de dois anos anteriormente mencionado. A representação gráfica foi elaborada de forma que os gráficos vistos na posição horizontal correspondem aos estágios que compartilham o mesmo eixo.

Na primeira análise visual dos gráficos é possível identificar que existe uma grande semelhança na curva de vibração entre alguns estágios, mais nitidamente entre o primeiro e segundo estágio. A vibração do terceiro estágio e a do mancal LOA apresentaram um comportamento semelhante entre si, apesar de não compartilharem o mesmo eixo, mas não foi identificado nenhuma razão que levasse a esse comportamento. A vibração do quarto estágio e do mancal do motor do LA apresentaram comportamentos únicos de vibração.



Figura 4 - Gráficos de vibração do compressor e motor



Fonte: Elaborada pelo autor

Em relação à magnitude da vibração, é possível visualizar que a vibração teve uma variação significativa no 1STG, com uma amplitude total para a amostra de 0,9903 mils. Para o 2STG houve também uma diferença relevante, 0,6243 mils, o que leva a identificar um possível problema associado ao eixo 1, uma vez que os demais pontos não possuem grandes diferenças, sendo 0,1789 mils, 0,1884 mils, 0,4074 mils e 0,2635 mils para o 3STG, 4STG, mancal do motor LOA e LA respectivamente.

A descontinuidade nos gráficos do 1STG, 2STG, 3STG e do mancal do motor LOA ocorreu após a execução de um trabalho de limpeza no trocador de calor de óleo, efetuada pela equipe de manutenção mecânica local, na data de 05/11/2015. Segundo relato dos técnicos de



manutenção, a atividade foi realizada para melhorar a capacidade do trocador de refrigerar o óleo, que estava com temperaturas elevadas, mas não sabia-se que a intervenção traria resultados benéficos para a vibração.

#### 4.3. Identificação do ponto crítico

No Quadro 1 são apresentados os valores reais de vibração do compressor em três momentos: Teste no fabricante (Estados Unidos), após o *startup* do equipamento (comissionamento) e dia de maior pico de vibração em condições normais de trabalho. A coluna “média da amostra” foi construída a partir dos dados coletados no intervalo anteriormente citado.

As duas últimas colunas mostram os valores configurados no PLC conforme recomendação do fabricante e estudo da equipe de engenharia. De maneira prática, quando o valor de vibração instantânea atingir o valor da coluna “alarme” será emitido um aviso na sala de controle. Quando o valor de vibração instantânea atingir o valor da coluna “alarme alto”, atuará a proteção eletrônica configurada no PLC e a máquina desligará automaticamente.

Quadro 1 – Comparação da vibração no compressor

DESCRIÇÃO	CENTRO DE TESTES (CAMERON COMPRESSION SYSTEMS)	PARTIDA (COMISSIONAMENTO) 20/06/2013	MAIOR PICO DE VIBRAÇÃO 23/10/2015	MÉDIA DA AMOSTRA	ALARME	ALARME ALTO
VIBRAÇÃO 1STG	0,4	0,96	2,06	1,51	1,43	1,8
VIBRAÇÃO 2STG	0,25	0,84	1,27	0,91	1,43	1,8
VIBRAÇÃO 3STG	0,55	0,64	0,69	0,59	1,12	1,41
VIBRAÇÃO 4STG	0,45	0,53	0,58	0,51	1,12	1,41

**Observação:** Valores de vibração em mils

Fonte: Elaborado pelo autor

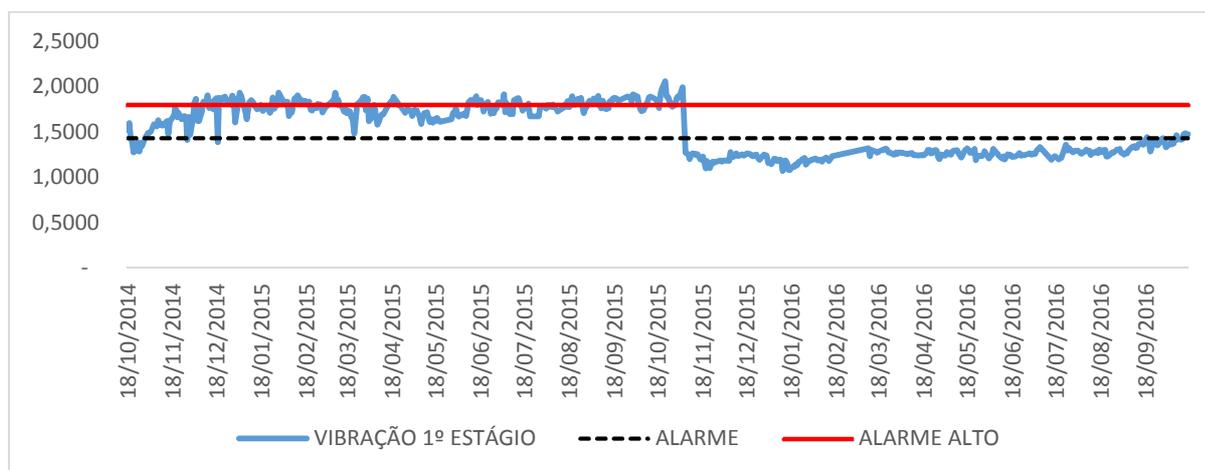


Os valores encontrados na central de testes do fabricante do equipamento são importantes mas não trarão grandes contribuições para identificar o problema encontrado. Os testes realizados foram efetuados com o compressor em uma condição muito mais favorável que a atual, de maneira que ele não estava submetido a grandes cargas de trabalho conforme acontece na aplicação atual.

Percebe-se muito claramente que a vibração do primeiro estágio ao longo de dois anos sofreu um grande aumento, conforme o Gráfico 1, e apesar do valor de pico ser um caso isolado de vibração alta, existem outros momentos de leituras de vibração muito próximo a este. Na análise do valor médio de vibração da amostra observa-se que o aumento foi suficiente para chegar na zona definida como alarme de vibração.

No período referente aos dados coletados foram identificadas diversas interrupções no processo produtivo por atuação da proteção contra vibração alta no primeiro estágio de compressor. A supervisão e corpo técnico do processo fez uma avaliação e identificou a necessidade de aumentar os valores de corte por vibração alta de 1.8 mils para 2.2 mils, evitando assim interrupções no processo produtivo. Tal alteração foi tomada após consulta e aprovação do setor de engenharia da empresa. Desta forma, entende-se como ponto crítico para o processo, a vibração no primeiro estágio de compressão, o qual é o principal causador de paradas não programadas da máquina e por apresentar maior risco de danos ao compressor.

**Gráfico 1 - Comportamento da vibração no primeiro estágio**



Fonte: Elaborado pelo autor



#### **4.4. Regressão múltipla**

##### **4.4.1. Seleção das variáveis preditoras**

A princípio, não se sabe com precisão quais são as variáveis que podem provocar alterações na vibração nem o quão forte é essa influência. Desta forma, foram identificados 17 pontos de leitura no compressor que possuem potencial para prever os efeitos da vibração. O motivo da escolha das variáveis são:

- ✓ **TEMPERATURA DE ÓLEO:** Se a temperatura estiver alta, o óleo ficará menos viscoso e não conseguirá reduzir com eficiência o atrito gerado, proporcionando um aumento da vibração entre os componentes internos (principalmente das engrenagens) além de não conseguir resfriá-los e deixando-os suscetíveis a quebras;
- ✓ **PRESSÃO DE ÓLEO:** Em sistemas de lubrificação, a pressão deve ser tal que vença toda a resistência ao fluxo do óleo. Se ela for menor, os componentes não serão lubrificados corretamente e as quebras poderão ocorrer em questão de minutos se o equipamento não tiver um sistema de monitoramento e desarme;
- ✓ **DIFERENCIAL DE PRESSÃO DE ÓLEO:** Os sistemas de lubrificação possuem filtros para impedir que possíveis sujeiras invadam os componentes da máquina. Se estes filtros estiverem causando muita obstrução ao fluxo, a lubrificação no equipamento poderá ficar comprometida;
- ✓ **PRESSÃO DE ENTRADA DO NITROGÊNIO:** O compressor trabalha com pressão diferencial, ou seja, a pressão de saída (entre estágios ou total) será a pressão de entrada mais o aumento de pressão projetado (constante a priori). Se a pressão de entrada estiver fora dos valores do projeto, o compressor poderá operar fora da curva de trabalho<sup>4</sup> e consequentemente gerar vibração fora dos níveis normais;
- ✓ **TEMPERATURA DE ENTRADA DE NITROGÊNIO:** Como já foi mencionado, o processo de compressão gera muito calor. Se o fluido de sucção estiver em uma temperatura mais alta ele contribuirá ainda mais para a geração de calor no sistema,

---

<sup>4</sup> A curva de trabalho do compressor é uma função não linear representada pela vazão e pressão de trabalho ou vazão e potência do motor. A operação do compressor fora da curva de trabalho trará perdas de eficiência e poderá levar o compressor à condição de surge.



gerando mais dilatação nos componentes do sistema, aquecimento do óleo, atrito e consequentemente, a vibração;

- ✓ **TEMPERATURA NO MANCAL DO MOTOR LOA:** Esta variável pode indicar a eficiência da refrigeração por óleo no mancal. Uma refrigeração ineficiente pode gerar maior atrito entre o eixo e mancal, levando ao surgimento de folgas excessivas e aumento de vibração posteriormente;
- ✓ **TEMPERATURA NO MANCAL DO MOTOR LA:** Conforme mencionado para a variável anterior;
- ✓ **POTÊNCIA DO MOTOR:** Um dos fatores que colaboram para o compressor trabalhar na curva de trabalho especificada pelo cliente é a potência do motor. Esta variável também está ligada com a capacidade que o compressor tem de comprimir o fluido de trabalho;
- ✓ **TEMPERATURA AMBIENTE:** Esta variável é uma fonte de adição de calor no sistema, tanto no fluido de trabalho quanto nos fluidos de arrefecimento;
- ✓ **TEMPERATURA DA ÁGUA DE REFRIGERAÇÃO:** A água de refrigeração é o principal fluido responsável por literalmente retirar o calor do sistema. Se esta não estiver em uma temperatura adequada o compressor poderá entrar em superaquecimento;
- ✓ **VAZÃO DE NITROGÊNIO:** A vazão de entrada e saída no sistema é a mesma. Um grande volume de produto fará com que aumente o trabalho de compressão, fazendo com que o compressor opere mais carregado e possivelmente forçado.

O Quadro 2 mostra qual variável independente está relacionada com a variável vibração de cada estágio do compressor e os pontos do motor. Algumas variáveis são comuns para todos os estágios e outras são particulares para cada estágio.



Quadro 2 - Relação entre variáveis independentes e dependentes

		VARIÁVEIS DEPENDENTES					
		VIBRAÇÃO 1STG	VIBRAÇÃO 2STG	VIBRAÇÃO 3STG	VIBRAÇÃO 4STG	VIBRAÇÃO MOTOR LOA	VIBRAÇÃO MOTOR LA
VARIÁVEIS INDEPENDENTES	TEMPERATURA DO ÓLEO (TO)	▲	▲	▲	▲	▲	▲
	TEMPERATURA DE ENTRADA DO NITROGÊNIO NO 1STG (TN1)	▲					
	TEMPERATURA DE ENTRADA DO NITROGÊNIO NO 2STG (TN2)		▲				
	TEMPERATURA DE ENTRADA DO NITROGÊNIO NO 3STG (TN3)			▲			
	TEMPERATURA DE ENTRADA DO NITROGÊNIO NO 4STG (TN4)				▲		
	TEMPERATURA NO MANCAL DO MOTOR LADO OPOSTO AO ACOPLADO (TLOA)					▲	
	TEMPERATURA NO MANCAL DO MOTOR LADO ACOPLADO (TLA)						▲
	PRESSÃO DE ÓLEO (PO)	▲	▲	▲	▲	▲	▲
	PRESSÃO DE ENTRADA DO NITROGÊNIO NO 1STG (PN1)	▲					
	PRESSÃO DE ENTRADA DO NITROGÊNIO NO 2STG (PN2)		▲				
	PRESSÃO DE ENTRADA DO NITROGÊNIO NO 3STG (PN3)			▲			
	PRESSÃO DE ENTRADA DO NITROGÊNIO NO 4STG (PN4)				▲		
	DIFERENCIAL DE PRESSÃO DE ÓLEO (PDIO)	▲	▲	▲	▲	▲	▲
	POTENCIA DO MOTOR(KWH)	▲	▲	▲	▲	▲	▲
	TEMPERATURA AMBIENTE (TA)	▲	▲	▲	▲	▲	▲
	TEMPERATURA DA AGUA DE REFRIGERACAO (TR)	▲	▲	▲	▲	▲	▲
	VAZAO DE NITROGÊNIO (VN)	▲	▲	▲	▲	▲	▲

Fonte: Elaborado pelo autor

Para resumir e identificar alguns comportamentos nas variáveis independentes mencionadas anteriormente, foi criada a Tabela 1 de estatística descritiva das variáveis preditoras para o 1STG, o ponto crítico anteriormente mencionado. As informações contidas nesta tabela serão úteis para apoiar as interpretações dos resultados da aplicação do método estatístico.



Tabela 1 - Tabela de análise descritiva das variáveis preditoras

627 amostras	V1STG	TO	PO	TN1	PN1	PDIO	KWH	TA	TR	VN	PD
Média	1,514	51,303	1,355	33,359	0,244	0,852	1725,708	26,527	28,038	13,029	13,85384
Mediana	1,475	51,571	1,351	33,322	0,242	0,791	1690,814	26,863	28,216	13,147	13,93055
Moda	1,672	52,907	1,347	28,764	0,204	0,859	1692,104	17,038	24,355	13,372	12,34584
Desvio padrão	0,266	5,042	0,027	3,762	0,031	0,180	74,966	3,752	1,475	0,795	0,819932
Variância	0,071	25,418	0,001	14,151	0,001	0,033	5619,918	14,081	2,176	0,632	0,672288
Mínimo	1,070	44,733	1,309	21,897	0,179	0,622	1314,685	14,972	23,843	9,007	11,33187
Máximo	2,061	61,902	1,774	40,797	0,301	1,573	1809,123	35,755	30,898	13,842	15,30446

Fonte: Elaborada pelo autor

#### 4.4.2. Método stepwise

Conforme as avaliações preliminares da vibração do compressor, identificou-se que o primeiro estágio é o ponto crítico de vibração. À vista disto, as análises estatísticas foram realizadas para este ponto em particular devido a ser o único ponto com potencial para gerar algum dano no compressor e por ser o local que está trazendo transtornos para o processo (paradas não programadas).

Como já mencionado anteriormente, houve uma manutenção corretiva no equipamento que ocasionou na diminuição do valor de vibração, desta forma, a amostra coletada foi dividida em dois períodos. O período 1 seria o intervalo entre o início da coleta até o dia anterior à intervenção mecânica, e o período 2, seria referente ao dia seguinte após a intervenção até o último dia de coleta. Foi então realizada a aplicação do método *stepwise* para cada período separadamente.

Utilizando-se o Minitab 18 para aplicação do método, foram obtidos os resultados expressos na Tabela 2. Verifica-se que para o período 1, Tabela 2 (a), o modelo explicaria 78,97% da variabilidade da variável dependente analisando o R<sup>2</sup>-ajustado, mas para o Período 2, Tabela 2 (b), apesar de se ter um melhor valor para o R<sup>2</sup>-ajustado, 86,39% a análise do VIF mostrou que existe a presença de muita multicolinearidade nos dados (TN1, PN1, PDIO). Desta forma, a análise passou a ser feita utilizando os dados do período 1 e 2 juntos para uma segunda investigação.



Tabela 2 - Resultado do método *stepwise* para o Período 1 e 2

Sumário do Modelo

S	R2	R2(aj)	R2(pred)
0,05677	79,56%	78,97%	30,96%

Coefficientes

Termo	Coef	EP de Coef	Valor-T	Valor-P	VIF
Constante	-0,272	0,309	-0,88	0,379	
TO	0,06374	0,00357	17,85	0	6
PO	0,7	0,299	2,34	0,02	5,85
TN1	-0,01402	0,00363	-3,86	0	6,66
PN1	-1,969	0,24	-8,19	0	2,07
PDIO	-0,56	0,154	-3,64	0	8,64
KWH	-0,00067	0,000137	-4,9	0	5,56
TA	0,00748	0,00172	4,35	0	4,62
TR	-0,01433	0,00426	-3,37	0,001	3,55
VN	0,01586	0,00558	2,84	0,005	1,86

a)

Sumário do Modelo

S	R2	R2(aj)	R2(pred)
0,026058	86,80%	86,39%	85,75%

Coefficientes

Termo	Coef	EP de Coef	Valor-T	Valor-P	VIF
Constante	-1,25	0,542	-2,3	0,022	
TO	0,05206	0,00326	15,95	0	4,82
PO	0,844	0,323	2,61	0,009	2,23
TN1	0,0057	0,00177	3,21	0,001	31,21
PN1	-0,085	0,18	-0,47	0,636	19,33
PDIO	-0,0488	0,0297	-1,64	0,101	19,97
KWH	-0,0003	0,00009	-3,31	0,001	3,77
TA	0,004213	0,000769	5,48	0	3,22
TR	-0,02774	0,00196	-14,12	0	3,88
VN	0,00055	0,00275	0,2	0,841	1,19

b)

Fonte: Adaptado da saída do Minitab 18

Os resultados iniciais na Tabela 3 (a) mostram que todos os dados juntos conseguem explicar 96,36% da variabilidade da variável dependente ( $R^2$ -ajustado), mas o VIF ainda indica que existe multicolinearidade, mais precisamente na variável TN1. O que houve de melhoria entretanto foi que o número de variáveis com multicolinearidade foi reduzido em relação a análise anterior.

Para complementar a avaliação do VIF, foi realizada uma análise na correlação das variáveis, conforme Tabela 4, e foi observado que a variável TN1 está mais fortemente correlacionada com outras variáveis independentes do modelo e pouco relacionada com a variável dependente. Deste modo, a variável TN1 foi removida do modelo e os dados foram apresentados na Tabela 3 (b).



**Tabela 3 - Resultado do método *stepwise* para a amostra completa**

**Sumário do Modelo**

S	R2	R2(aj)	R2(pred)
0,050808	96,41%	96,36%	96,11%

**Coefficientes**

Termo	Coef	EP de Coef	Valor-T	Valor-P	VIF
Constante	0,142	0,195	0,73	0,468	
TO	0,047525	0,00069	68,87	0	2,93
PO	-0,201	0,114	-1,77	0,077	2,23
TN1	0,00572	0,00186	3,08	0,002	11,82
PN1	-0,678	0,148	-4,6	0	4,98
PDIO	-0,01	0,0278	-0,36	0,72	6,11
KWH	-0,00023	0,000053	-4,34	0	3,78
TA	0,004149	0,00094	4,41	0	3,02
TR	-0,02088	0,00249	-8,37	0	3,28
VN	0,00467	0,00351	1,33	0,183	1,89

a)

**Sumário do Modelo**

S	R2	R2(aj)	R2(pred)
0,051156	96,35%	96,31%	96,13%

**Coefficientes**

Termo	Coef	EP de Coef	Valor-T	Valor-P	VIF
Constante	0,281	0,191	1,47	0,142	
TO	0,047291	0,000691	68,48	0	2,9
PO	-0,29	0,111	-2,62	0,009	2,09
PN1	-0,511	0,138	-3,7	0	4,31
PDIO	0,0459	0,0212	2,16	0,031	3,51
KWH	-0,00029	0,000049	-5,89	0	3,25
TA	0,006085	0,000704	8,65	0	1,67
TR	-0,01686	0,00214	-7,88	0	2,38
VN	0,00737	0,00342	2,16	0,032	1,77

b)

Fonte: Adaptado da saída do Minitab 18

Apesar da remoção de uma variável, o R<sup>2</sup>-ajustado permaneceu muito representativo (96,31%), tendo apenas uma perda de 0,05% na explicação da variabilidade da variável dependente. Nesta nova análise o VIF apresentou valores inferiores a 5, o que leva a concluir que os efeitos da multicolinearidade provavelmente não irão influenciar na análise do modelo. O valor-p para as novas variáveis preditoras ficaram abaixo de 0,05, indicando uma associação significativa com a variável resposta.

Fazendo uma análise da correlação das variáveis (Tabela 4) utilizadas neste último modelo é possível identificar que as variáveis TO, PO e KWH estão fortemente correlacionadas com a variável dependente VN1. Como o p-valor para estas são menores que o nível de significância de 0,05, conclui-se que existem evidências estatísticas de que as variáveis possuem correlação com VN1.

Para algumas variáveis preditoras, o p-valor foi maior que o nível de significância de 0,05, o que leva a concluir que estas variáveis não possuem evidências estatísticas de que existem correlação entre si. Entretanto, como VIF para o modelo ficou em valores toleráveis, esses pontos provavelmente não irão impactar negativamente nos dados.



Tabela 4 - Correlação entre as variáveis do modelo

Correlações

	V1STG	TO	PO	PN1	PDIO	KWH	TA	TR
TO	0,975 0,000							
PO	-0,699 0,000	-0,704 0,000						
PN1	-0,337 0,000	-0,265 0,000	0,201 0,000					
PDIO	-0,511 0,000	-0,476 0,000	0,402 0,000	0,783 0,000				
KWH	-0,701 0,000	-0,671 0,000	0,545 0,000	0,435 0,000	0,468 0,000			
TA	0,040 0,314	0,036 0,372	-0,010 0,805	0,327 0,000	0,126 0,002	0,054 0,175		
TR	-0,153 0,000	-0,088 0,028	0,028 0,489	0,598 0,000	0,375 0,000	0,107 0,008	0,612 0,000	
VN	-0,393 0,000	-0,386 0,000	0,334 0,000	0,197 0,000	0,221 0,000	0,647 0,000	-0,042 0,296	-0,024 0,549

Conteúdo da Célula  
Correlação de Pearson  
Valor-p

Fonte: Adaptado da saída do Minitab 18

#### 4.4.3. Método *best subsets*

O método *best subsets* foi um segundo método utilizado visando identificar quais variáveis deveriam compor o modelo de regressão para que posteriormente seja montada a equação matemática capaz de prever a variável dependente estudada, a V1STG. A Tabela 5 mostra o resultado da aplicação do método.

A escolha do melhor modelo partiu da identificação do menor indicador de CP de Mallows, que apresentou o valor 9 para o então melhor modelo. Este modelo contempla todas as 8 variáveis contidas no método *stepwise*, apresentando uma explicação de 96,3% da variabilidade da variável V1STG.



**Tabela 5 - Resultado do método *best subsets***

Vars	R2	R2 (aj)	R2 (pred)	Cp de Mallows	S	P																		
						T	P	N	I	W	T	T	V	O	O	1	O	H	A	R	N			
1	95	95	94,9	229	0,05973	X																		
1	49,1	49	48,4	8005,9	0,19008																X			
2	95,6	95,6	95,6	118,6	0,05569	X		X																
2	95,4	95,4	95,4	152,9	0,05697	X																X		
3	95,8	95,8	95,7	93,4	0,0547	X															X	X		
3	95,8	95,8	95,7	96,4	0,05482	X															X	X		
4	96,2	96,2	96,1	26	0,05201	X															X	X	X	
4	96	96	96	54,7	0,05316	X		X													X	X		
5	96,3	96,2	96,1	17,2	0,05162	X		X													X	X	X	
5	96,2	96,2	96	22,7	0,05184	X	X														X	X	X	
6	96,3	96,3	96	14,1	0,05145	X	X	X													X	X	X	
6	96,3	96,3	96,2	15	0,05149	X		X													X	X	X	X
7	96,3	96,3	96,1	11,6	0,05131	X	X	X	X												X	X	X	X
7	96,3	96,3	96	11,7	0,05131	X	X	X													X	X	X	X
8	96,4	96,3	96,1	9	0,05116	X	X	X	X	X											X	X	X	X

Fonte: Adaptado da saída do Minitab 18



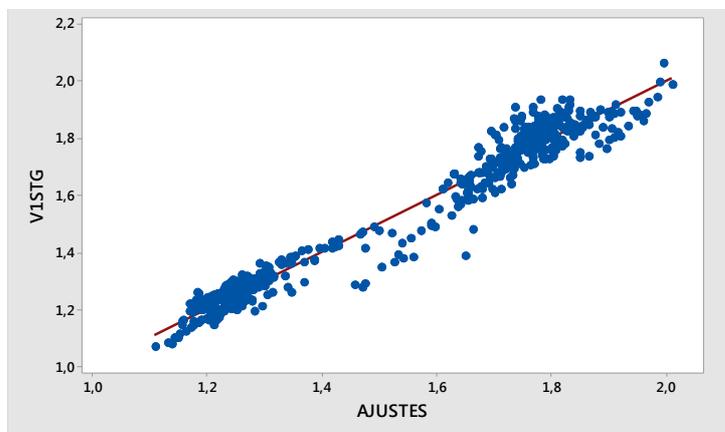
## Capítulo 5. Resultados

Utilizando-se os coeficientes obtidos na Tabela 3 (b) e as variáveis indicadas pelo método *best subsets* obteve-se a seguinte equação matemática de regressão para a vibração do 1STG:

$$\begin{aligned} \text{V1STG} = & 0,281 + 0,047291 \text{ TO} - 0,290 \text{ PO} - 0,511 \text{ PN1} + 0,0459 \text{ PDIO} \\ & - 0,000289 \text{ KWH} + 0,006085 \text{ TA} - 0,01686 \text{ TR} + 0,00737 \text{ VN} \end{aligned} \quad (3)$$

A Figura 5 mostra a comparação visual dos dados observados da vibração 1STG (pontos) com os valores previstos (reta de regressão) através da Equação (3). Pode-se observar que houve uma concentração maior nas extremidades da reta, que se dá pela variação dos níveis de vibração referente aos períodos 1 e 2, anteriormente citados, entretanto, o comportamento geral se mostrou bem ajustado.

Figura 5 - Gráfico de dispersão de vibração no 1STG *versus* ajustes

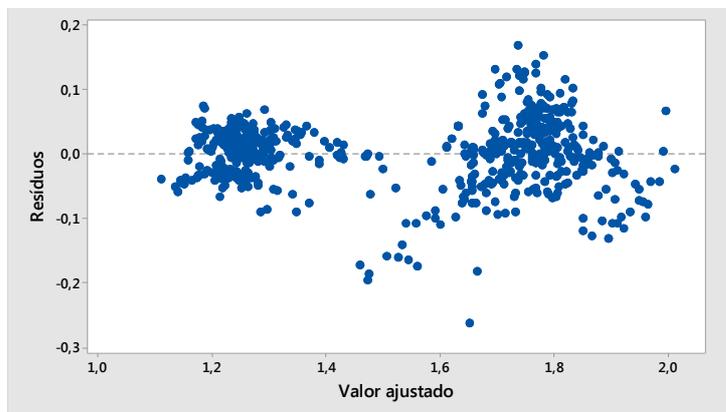


Fonte: Adaptado da saída do Minitab 18

A existência de dois períodos com níveis de vibração diferentes afetou também o resultado do Figura 6, onde se mostra a comparação dos resíduos *versus* os valores ajustados. Embora esta análise não apresente muita precisão percebe-se claramente que os pontos estão distribuídos aleatoriamente em dois pontos (correspondente aos períodos 1 e 2).



Figura 6 - Dispersão dos resíduos *versus* valor ajustado



Fonte: Adaptado da saída do Minitab 18

Foi realizado o cálculo do MAPE (Tabela 6) também para ajudar a identificar a análise dos resíduos e obteve-se a variação média global de 2,44%, que ajuda a confirmar que o modelo proposto obteve um bom ajuste aos dados reais.

Tabela 6 - MAPE

Amostra	Valor Real	Valor Previsto	Diferença	Percentual
1	1,526	1,625	0,100	6,54%
2	1,597	1,654	0,057	3,59%
3	1,446	1,556	0,109	7,56%
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
623	1,417	1,421	0,004	0,27%
624	1,470	1,471	0,001	0,08%
625	1,486	1,491	0,005	0,37%
626	1,462	1,468	0,005	0,37%
627	1,475	1,499	0,024	1,61%
<b>MAPE</b>				<b>2,44%</b>

Fonte: Elaborada pelo autor

O objetivo geral deste estudo foi identificar as variáveis capazes de influenciar a vibração, e buscar, se possível, formas de minimizar seus valores em magnitude para evitar que apareçam danos no compressor observado. À vista disso, analisando a equação de regressão gerada foi observado que os coeficientes das variáveis PO e PN1 são os que mais influenciam



a variável V1STG, e de forma benéfica, uma vez que seus valores são negativos na equação e contribuem para a diminuição da vibração. Em outras palavras, quanto maior o valor destas duas variáveis, melhor deve ficar a vibração.

Porém, analisando a Tabela 1 de estatística descritiva pode-se observar que estas são as variáveis com menor variância na amostra (0,001 para ambas) e, conseqüentemente possuem desvio padrão pequeno, ou seja, durante o processo de compressão os valores destas variáveis não sofrem variações significativas. Outra análise que deve ser feita é quanto ao valor absoluto das variáveis PO e PN1, que dos quais são relativamente pequenos comparados com as demais variáveis independentes do modelo. Confrontando a análise das variáveis com a operação prática do compressor em condições normais de trabalho, é possível realizar pequenas alterações manualmente nos valores de PO e PN1, mas em escala decimal ou centesimal, causando pouco impacto na vibração.

Fazendo uma análise inversa, a variável com maior variância no modelo é a KWH. Esta possui ainda um desvio padrão relativamente pequeno (74,966) analisando o comportamento da variável como um todo e seu valor absoluto (na ordem de unidade de milhar). Na equação de regressão, o coeficiente absoluto encontrado para esta variável é muito pequeno (0,000289), e possui uma influência negativa para o resultado da equação, favorecendo a diminuição do valor da vibração. Como o valor da variável em módulo é grande, entende-se que esta influencia fortemente a vibração.

Ainda na variável KWH, observou-se em campo que o PLC controla a variável automaticamente, conforme o volume de produto demandado pelo cliente. Os motivos para alteração desta variável é a necessidade de se ter um baixo consumo de energia elétrica em relação às diversas demandas pelo cliente e devido ao mecanismo de controle de surge que a máquina possui.

Outra observação realizada foi que os técnicos de produção realizam aumentos no valor da KWH de forma gradativa e empírica (sob consentimento da supervisão) de modo a melhorar a vibração do equipamento, mesmo não tendo uma previsão confortável do resultado ou um parâmetro de limite (superior e inferior) para a realização desta mudança. A intervenção por sua vez não é realizada manualmente com frequência.



Outra variável que se deve ter grande atenção é a TO. O coeficiente apontado para esta variável tem um valor mediano em relação aos demais (0,047291) e de influência positiva para o aumento da vibração do equipamento. Apesar do desvio padrão não ter sido tão grande na amostra (5,042) esta variável tende a crescer ao longo do tempo e não se pode realizar alterações nela de maneira simples. Para reduzir o valor da variável é necessário realizar uma intervenção mecânica nas poucas oportunidades de parada programada devido à falta de consumo pelo cliente e que ocorrem a cada 45 dias aproximadamente.

A variável PDIO possui pouca influência na vibração e não traz grandes preocupações, devido a existir alarmes que indicam que seu valor está próximo de um valor crítico (valor estabelecido pelo fabricante). A alteração nesta variável é feita diretamente no compressor, e para que ela ocorra, não é necessário que se interrompa o processo de compressão.

A variável TA também não traz muita preocupação pois é impossível realizar algum tipo de ação contra ela e por ter baixa influência no resultado da vibração. Existem poucas formas de trabalhar na variável TR, mais de qualquer maneira ela representa certa contribuição para a diminuição da vibração e melhora os indicadores de temperatura no equipamento.

A variável VN altera conforme a demanda do cliente e não se pode modificá-la para não ocorrer falta de atendimento. Para esta variável melhorar o efeito indesejável da vibração é necessário que a vazão diminua. Por sua vez, para não afetar o fornecimento é necessário investir em capacidade produtiva (novo compressor por exemplo), ou utilizar outros artifícios que a fábrica possui (sistema de *backup*<sup>5</sup>), entretanto, se torna inviável economicamente.

---

<sup>5</sup> O sistema de *backup* consiste de um “estoque” de nitrogênio no estado líquido que é vaporizado (transformado para o estado gasoso) em casos de parada acidental do compressor ou da planta de fabricação, garantindo o atendimento ao cliente por um período limitado de tempo. O custo de produção do nitrogênio no estado líquido é muito maior que o do nitrogênio gasoso, o que torna inviável a utilização do sistema de *backup* com frequência.



## Capítulo 6. Conclusões e sugestões

O modelo de regressão encontrado obteve ajustes satisfatórios em relação aos dados reais, e os valores estatísticos para este foram muito significativos, com o  $R^2$ -ajustado de 96,3% e um baixo percentual de erro para resíduos, entretanto, a análise da equação deve ser feita de maneira minuciosa para que não sejam tomadas conclusões precipitadas.

Por meio da análise do modelo pôde ser concluído que existem variáveis no processo capazes de influenciar a variável vibração. O conhecimento adquirido permitiu identificar a intensidade com que cada variável independente atua na vibração do compressor, mais especificamente no primeiro estágio, sendo as que impactam mais fortemente são: Temperatura do óleo lubrificante (TO) e a potência do motor elétrico (KWH).

Mediante aos resultados obtidos, um engenheiro de manutenção com foco na confiabilidade, saberá agir corretivamente e preventivamente em situações adversas de vibração excessiva e até mesmo em situações normais de maneira a evitar que o equipamento abordado se deteriore prematuramente ou indevidamente por meio de uma ação humana, uma vez que parte das variáveis identificadas podem ser alteradas manualmente.

Esse conhecimento adquirido se mostrou muito útil em situações críticas de operação do compressor com vibração ainda mais elevada e sem oportunidades de paradas programadas previstas. Anteriormente a este estudo, as alternativas seriam parar o fornecimento para o cliente, lidar com paradas frequentes devido aos desarmes da máquina e afetar a confiabilidade do processo, deixando a máquina se desgastar. Após a obtenção do modelo de regressão será possível atuar nos “pontos corretos” do processo de modo a manter o compressor em condições “seguras” até uma próxima parada programada para manutenção e intervenção corretiva caso necessário.

Mediante as informações adquiridas com este estudo, também podem ser tomadas ações preventivas de modo a assegurar o bom desempenho e funcionamento do compressor. Visto que a pressão e a temperatura de óleo impactam fortemente na vibração, devem ser estabelecidas inspeções periódicas mais frequentes nos componentes do sistema de lubrificação do compressor, tais como, trocador de calor, bombas de óleo (principal e auxiliar), sistema de vácuo, filtros, válvulas reguladoras de pressão, sistemas eletrônicos de monitoramento (termopares e pressostatos).



Devido a impossibilidade de realizar testes no equipamento em operação, propõe-se para trabalhos futuros a aplicação de ferramentas de simulação para avaliar o resultado do modelo de regressão encontrado.

Outro estudo que poderia ser cogitado em realizar seria a aplicação do modelo em outros compressores centrífugos de modo a identificar se os resultados obtidos aqui são apenas um resultado particular ou se eles poderiam ser generalizados para outros equipamentos.



## Referências

BASSETTO, Izeds Felipe F. **Estudo de confiabilidade de compressores alternativos semi-herméticos de sistemas de refrigeração**. Dissertação apresentada à Escola Politécnica da Universidade de São Paulo como requisito para obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica. São Paulo, 2007.

BLOCH, Heinz P.; GEITNER, Fred K. **Compressores: um guia prático para a confiabilidade e a disponibilidade**. Tradução Otávio Vescovi. Porto Alegre: Bookman, 2014.

CABRAL J. **Gestão da Manutenção, de Equipamentos, Instalações e Edifícios**. 1. ed. Editora Lidel, 2009.

CAMPOS, Diogo C. M. P. **Implementação de técnicas e ferramentas para manutenção preditiva na Colep**. Dissertação de Mestrado apresentada à Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto Mestrado. FEUP, 2011

COLET, Marcelo J.; NETO, Pedro H. W.; GARBUIO, Paulo W.; SCHIMANDEIRO, Adriana. Processo de semeadura e o rendimento do milho na região dos Campos Gerais do Paraná. **Ciência Rural**, Santa Maria, v.37, n.4, p. 994-999, jul-ago de 2007.

COSTA, Mariana de Almeida. **Gestão estratégica de manutenção : uma oportunidade para melhorar o resultado operacional**. Trabalho de conclusão de curso de Engenharia de Produção da Universidade Federal de Juiz de Fora. Juiz de Fora, 2013.

FARIA, S. M. M. F. S. **Modelos de mistura: Aplicações em análise de regressão**. Dissertação apresentada à Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto para obtenção do grau de Doutor. FEUP, 2006.

FELÍCIO, Gonçalo M. G. **Diagnóstico de Avarias em Máquinas Rotativas utilizando a Análise de Órbitas**. Trabalho Final de Mestrado para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Mecânica Perfil Manutenção e Produção, Instituto superior de engenharia de Lisboa, 2015.



FOGLIATTO, Flávio S.; RIBEIRO, José Luis D. **Confiabilidade e manutenção industrial**. Rio de Janeiro: Elsevier, 2011.

FRANÇA, Luís N. F.; SOTELO JÚNIOR, José. **Introdução às vibrações mecânicas**. 1.ed. São Paulo: Edgard Blucher, 2013.

FUENTES, Fernando F. E. **Metodologia para inovação da gestão de manutenção industrial**. Tese de doutorado submetida à Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, Outubro 2006.

GÁRCIA, Maurício Sanches. **Análise de defeitos em sistemas mecânicos rotativos a partir da monitoração de vibrações**. Tese de Doutorado em Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2005.

GIL, A. C. **Métodos e técnicas de pesquisa social**. 6. ed. São Paulo: Atlas, 2008.

HAIR Jr., J. F.; BLACK, W. C.; BABIN, B. J.; ANDERSON, R. E.; TATHAM, R.L. **Análise multivariada de dados**. 6.ed. Porto Alegre, Bookman, 2009. p. 688.

HOLANDA, Sandra Maria Santos. **Aplicação da manutenção preditiva por análise de vibrações em equipamentos de trens urbanos com plano de manutenção proposto**. Recife: UFPE, 2016. Originalmente apresentada como dissertação de mestrado, Universidade Federal de Pernambuco, 2016.

KAUARK, Fabiana S.; MANHÃES, Fernanda C.; MEDEIROS, Carlos H. **Metodologia da pesquisa: guia prático**. Itabuna: Via Litterarum, 2010.

LAGO, D. F. **Manutenção de redutores de velocidade pela integração das técnicas preditivas de análise de vibrações e análise de óleo lubrificante**. Dissertação de mestrado apresentada à Faculdade de Engenharia – UNESP. Ilha Solteira, 2007.



LEWIS, C. D. **Demand Forecasting and Inventory Control**. New York: Wiley, 1997.

MARÇAL, Rui F. M. **Um método para detectar falhas incipientes em máquinas rotativas baseado em análise de vibrações e lógica FUZZY**. Tese de doutorado. Programa de pós-graduação em engenharia metalúrgica de Minas Gerais – PPGEM. Porto Alegre, 2000.

MECABÔ, Leonardo. **Desenvolvimento de um protótipo de sistema especialista para apoio à manutenção de turbocompressores centrífugos de gás Natural**. Dissertação de mestrado apresentada à Universidade Federal de Santa Catarina - Programa de pós-graduação em Engenharia Mecânica. Florianópolis, 2007.

MILOCA, Simone A.; CONEJO, Paulo D. **Multicolinearidade em Modelos de Regressão**. XXII Semana Acadêmica da Matemática. Cascavel, 2011.

MONTGOMERY, Douglas C.; RUNGER, George C. **Estatística aplicada e probabilidade para engenheiros**. 4 ed. LTC, 2003.

MOUBRAY, John. **Introdução à Manutenção Centrada na Confiabilidade**. São Paulo: Aladon, 1996.

NASCIF, Júlio. **Manutenção: tipos e tendências**. [2015]. Disponível em:  
<<http://www.tecem.com.br/wp-content/uploads/2015/02/GP003-MANUTEN%C3%87%C3%83O-TIPOS-E-TEND%C3%84NCIAS-Julio-Nascif.pdf>>.  
Acessado em: 25 abr. 2017.

NÓBREGA, Paulo. R. L. **Propostas de práticas de nível mundial na manutenção de compressores centrífugos**. Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, da Faculdade de Engenharia, Arquitetura e Urbanismo, da Universidade Metodista de Piracicaba UNIMEP. Santa Bárbara d'Oeste, 2008.



OLIVEIRA, Thiago H. de. **Correlação entre diferentes métodos de avaliação da composição corporal e indicadores antropométricos em escolares**. Dissertação apresentada à Universidade Federal de Minas Gerais para obtenção do Título de Mestre em Ciências da Saúde pelo programa de pós-graduação em Saúde da Criança e do Adolescente. Belo Horizonte, 2010.

OTANI, M.; MACHADO, W. V. A proposta de desenvolvimento de gestão da manutenção industrial na busca da excelência ou classe mundial. **Revista Gestão Industrial**. v. 4, n.2, 2008.

PARREIRA, Rui. M. R. **Análise de dados de vibração. Contributo para a definição do estado de condição**. Originalmente apresentado como dissertação de mestrado, Instituto Superior de Estatística e Gestão da Informação da Universidade Nova de Lisboa, 2009.

PRODANOV, Cleber. C.; FREITAS, Ernani. C. **Metodologia do trabalho científico: Métodos e Técnicas da pesquisa e do trabalho acadêmico**. 2. ed. Novo Hamburgo: Feevale, 2013

REIS, Luciana P.; COUTO, André C. S.; FERNANDES, June M. **Modelagem matemática para a predição do limite de resistência de aços produzidos por uma siderúrgica**. XXXV Encontro Nacional de Engenharia de Produção. Fortaleza, 2015.

ROMUALDO, Marcelo S. **Otimização geométrica e aerodinâmica de um impelidor de compressor centrífugo**. Originalmente apresentado como dissertação de mestrado à Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2011.

SAMOHYL, R. W. **Controle Estatístico da qualidade**. Rio de Janeiro: Elsevier, 2009.

SANTOS, Wagner B. dos; COLOSIMO, Enrico A.; MOTTA, Sérgio, B. Tempo ótimo entre manutenções preventivas para sistemas sujeitos a mais de um tipo de evento aleatório. **Revista Gestão e Produção**. São Carlos, v. 14, n. 1, p. 193-202, jan – abr. 2007.



SELLITTO, Miguel A.; BORCHARDT, Miriam; ARAÚJO, Daniel R.C. **Manutenção centrada em confiabilidade: Aplicando uma abordagem quantitativa.** XXII Encontro Nacional de Engenharia de Produção. Curitiba, 2002.

SILVA, Derick H. de J. **Processamento de sinais para monitoramento de vibrações em unidades geradoras hidrelétricas.** Dissertação submetida à Universidade Federal de Minas Gerais para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Elétrica. Belo Horizonte, 2013.

TOMÉ, Paôla T. F. **Modelo de previsão de demanda: Uma aplicação no transporte rodoviário interestadual de passageiros por ônibus na região sul do Brasil.** Monografia apresentada à Universidade Federal de Santa Catarina para Licenciatura em Matemática. Florianópolis, 2007.

TURRIONI, João B.; MELLO, Carlos H. P. **Metodologia de pesquisa em engenharia de produção.** Programa de pós graduação em engenharia de produção da universidade federal de Itajubá. UNIFEI, 2011.

WENDLAND, Leonardo S.; TAUCHEN, Joel. **Gestão Estratégica de Manutenção.** [recurso eletrônico]. 1ª Semana Acadêmica – Engenharia de Produção – FAHOR. Disponível em: <[http://www.fahor.com.br/publicacoes/saep/2010\\_gestao\\_estrategica\\_manutencao.pdf](http://www.fahor.com.br/publicacoes/saep/2010_gestao_estrategica_manutencao.pdf)>. Acessado em 23 de abr. 2017.

WYREBSK, J. **Manutenção Produtiva Total - Um Modelo Adaptado.** Dissertação de mestrado apresentada à Universidade Federal de Santa Catarina para o título de Mestre em Engenharia. Florianópolis, 1997.