

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE ELETROTÉCNICA
ESPECIALIZAÇÃO EM ENGENHARIA DA CONFIABILIDADE**

THIAGO ENGUERT HILLER DE MESQUITA

**INFLUÊNCIA DE VARIÁVEIS DE PROCESSO NO NÍVEL DE
VIBRAÇÃO DE UM CONJUNTO MOTOBOMBA DE GRANDE PORTE**

MONOGRAFIA

CURITIBA

2016

THIAGO ENGUERT HILLER DE MESQUITA

**INFLUÊNCIA DE VARIÁVEIS DE PROCESSO NO NÍVEL DE
VIBRAÇÃO DE UM CONJUNTO MOTOBOMBA DE GRANDE PORTE**

Trabalho de Monografia apresentado como requisito parcial à obtenção do título de Especialista em Engenharia de Confiabilidade, do Departamento Acadêmico de Eletrotécnica, da Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

Orientador: Emerson Rigoni, Dr. Eng.

Co-orientador: Claudio Spanó

CURITIBA

2016



TERMO DE APROVAÇÃO

INFLUÊNCIA DE VARIÁVEIS DE PROCESSO NO NÍVEL DE VIBRAÇÃO DE UM CONJUNTO MOTOBOMBA DE GRANDE PORTE

por

THIAGO ENGUERT HILLER DE MESQUITA

Esta Monografia foi apresentada em quinze de dezembro de 2016 como requisito parcial para a obtenção do título de Especialista em Engenharia de Confiabilidade. O candidato foi arguido pela Banca Examinadora composta pelos professores abaixo assinados. Após deliberação, a Banca Examinadora considerou o trabalho aprovado.

Prof. Emerson Rigoni, Dr. Eng.
UTFPR

Prof. Carlos Henrique Mariano Dr.
UTFPR

Prof. Marcelo Rodrigues Dr.
UTFPR

- O Termo de Aprovação assinado encontra-se na Coordenação do Curso -

Dedico este trabalho a Deus, autor de toda a sabedoria, à minha querida esposa Naiaja e minha filhinha Nalu que me deram toda a motivação necessária.

RESUMO

ENGUERT HILLER DE MESQUITA, Thiago. **Influência de variáveis de processo no nível de vibração de um conjunto motobomba de grande porte**. 2016. 52 folhas. Trabalho de Monografia (Especialização em Engenharia de Confiabilidade) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2016.

É sabido que variáveis de processo influenciam o nível de vibração das máquinas, especialmente onde o mesmo sistema deve operar em diversos cenários diferentes. Neste caso, um oleoduto que deve operar com uma grande variedade de produtos em diferentes vazões. O objetivo inicial deste trabalho era quantificar o impacto das diferentes condições operacionais no nível de vibração de um conjunto motobomba de um oleoduto de petróleo. Porém, ao final, atingiu-se um objetivo ainda mais interessante que foi a possibilidade de prever o nível de vibração esperado baseado nas condições de vazão de bombeio e densidade do produto bombeado. Dessa maneira podemos identificar em tempo real se as condições operacionais medidas por meio das variáveis de processo estão contribuindo para um aumento de vibração e possíveis danos ao equipamento. Além disso, através da previsão, diferenciar potenciais falhas de aumentos de vibração inofensivos causados pela mudança das condições operacionais.

Palavras-chave: Delineamento de Experimentos. Análise de Vibração. Manutenção. Estação de Bombeio. Oleoduto.

ABSTRACT

ENGUERT HILLER DE MESQUITA, Thiago. **Influence of process variables on vibration level of a large pump set.** 2016. 52 folhas. Trabalho de Monografia (Especialização em Engenharia de Confiabilidade) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2016.

It is known that process variables influence the level of vibration of machines, especially where the same system should operate in several different scenarios. In this case, a pipeline must operate with a wide variety of products at different flow rates. The initial objective of this study was to quantify the impact of different operating conditions on the level of vibration of motor and pump of an oil pipeline. But in the end, the study accomplished a more interesting goal, which was, the possibility to provide the expected level of vibration based on the flow rate and density of the pumped product. In this way, it is possible to identify, in real time, whether the operating conditions of flow rate and density are contributing to an increase in vibration and possible damage to the equipment. Furthermore, it will become easier to differentiate between potential faults and harmless vibration increases caused by changes in operating conditions.

Keywords: Design of Experiments. Vibration Analysis. Maintenance. Pump Station. Pipeline.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Diagrama esquemático da Estação de Santa Isabel na tela do sistema supervisorio.....	16
Figura 2 - Conjunto motobomba e pontos de monitoramento de vibração na tela do sistema supervisorio	17
Figura 3 - Exemplo de Influência da vazão no nível de vibração na tela do sistema supervisorio.....	19
Figura 4 - Curvas Head x Vazão e Vibração x Vazão.....	20
Figura 5 - Vazões para combinação de 1 ou 2 bombas em operação.....	29
Figura 6 - Distribuição de vazão geral	30
Figura 7 - Determinação dos limites das variáveis no Weibull++	31
Figura 8 - Delineamento fatorial de dois níveis no DOE++	32
Figura 9 - Gráfico de Pareto para o ponto Vib1 no DOE++	33
Figura 10 - Fatorial completo Densidade e Pressão Diferencial no DOE++	34
Figura 11 - Gráfico de Pareto Vib3 no DOE++	35
Figura 12 - Gráfico de Pareto Vib4 no DOE++	35
Figura 13 - Gráfico de Pareto Vib5 no DOE++	36
Figura 14 - Gráfico de Pareto Vib6 no DOE++	36
Figura 15 - Pareto Vib3 no DOE++	39
Figura 16 - Pareto Vib4 no DOE++	40
Figura 17 - Pareto Vib5 no DOE++	41
Figura 18 - Pareto Vib6 no DOE++	42
Figura 19 - Erro Vib3 Bomba A	43
Figura 20 - Erro Vib4 Bomba A	43
Figura 21 - Erro Vib5 Bomba A	44
Figura 22 - Erro Vib6 Bomba A	44
Figura 23 - Interação Densidade x Vazão no motor no DOE++.....	45
Figura 24 - Cálculo da vibração prevista no sistema supervisorio	46
Figura 25 - Histórico da vibração prevista no sistema supervisorio	47
Figura 26 - Interação Vazão x Densidade no motor no DOE++.....	48
Figura 27 - Interação Vazão x Diferencial de pressão na bomba no DOE++.....	49
Figura 28 - Comparação do nível de vibração previsto e real através do sistema supervisorio.....	50

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Dados de placa dos motores da estação de bombeio	18
---	----

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Vazões possíveis para combinações de densidade e diferencial de pressão	32
Tabela 2 - Respostas delineamento bomba	37
Tabela 3 - Fatores delineamento bomba.....	37
Tabela 4 - Resumo delineamento bomba.....	37
Tabela 5 - Respostas delineamento motor	38
Tabela 6 - Fatores delineamento motor.....	38
Tabela 7 - Resumo delineamento motor	38

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	12
1.1	FORMULAÇÃO DO PROBLEMA.....	12
1.2	JUSTIFICATIVA.....	12
1.3	OBJETIVOS.....	13
1.3.1	Objetivo Geral.....	13
1.3.2	Objetivos Específicos.....	13
1.4	METODOLOGIA.....	13
1.5	ESTRUTURA DO TRABALHO.....	14
2	APRESENTAÇÃO DO OBJETO DE ESTUDO.....	15
2.1	ESTAÇÃO DE BOMBEIO INTERMEDIÁRIA DE SANTA ISABEL.....	15
2.2	CONJUNTO MOTOBOMBA.....	16
3	EMBASAMENTO TEÓRICO.....	19
3.1	PRINCÍPIOS DE OPERAÇÃO DO CONJUNTO MOTOBOMBA.....	19
3.2	INTRODUÇÃO AO DELINEAMENTO DE EXPERIMENTOS.....	21
3.2.1	TIPOS DE DOE.....	22
3.2.1.1	Para comparação: Delineamento de um fator.....	22
3.2.1.2	Para triagem de fatores: Delineamentos fatoriais.....	22
3.2.1.2.1	<i>Delineamentos fatoriais completos.....</i>	<i>23</i>
3.2.1.2.2	<i>Delineamentos fatoriais de dois níveis.....</i>	<i>23</i>
3.2.1.2.3	<i>Delineamento fatorial fracionado de dois níveis.....</i>	<i>23</i>
3.2.1.2.4	<i>Delineamento Plackett-Burman.....</i>	<i>23</i>
3.2.1.2.5	<i>Matrizes ortogonais de Taguchi.....</i>	<i>24</i>
3.2.1.3	Para otimização: Delineamentos com superfície de reposta.....	24
3.2.1.4	Para robustez do processo: Delineamento de parâmetros robustos.....	24
3.2.2	PRINCÍPIO IMPORTANTES DE DOE.....	24
3.2.2.1	Aleatoriedade.....	25
3.2.2.2	Replicação.....	25
3.2.2.3	Blocagem.....	26
4	DESENVOLVIMENTO DO TRABALHO.....	27
4.1	APLICAÇÃO DA TÉCNICA DE DOE NO PROBLEMA ESTUDADO.....	27
4.1.1	Aleatoriedade.....	27
4.1.2	Replicação.....	27
4.1.3	Blocagem.....	27
4.1.4	Determinação dos limites de variação de cada fator.....	28
4.1.5	Delineamento de triagem.....	31
4.1.6	Delineamento para aprofundamento dos resultados.....	37
4.2	VERIFICAÇÃO DO MODELO.....	43
4.3	POSSIBILIDADE DE REDUÇÃO DO EFEITO DO RUÍDO.....	44

4.4	IMPLEMENTAÇÃO NO SISTEMA SUPERVISÓRIO	45
4.5	ANÁLISE GERAL DOS RESULTADOS	47
5	CONCLUSÃO	51
6	REFERÊNCIAS	52

1 INTRODUÇÃO

Os oleodutos são o meio de transporte mais eficaz para transferência de petróleo e derivados em longas distâncias. A força motriz desse sistema é fornecida por bombas localizadas em pontos estratégicos do oleoduto garantindo que o produto seja transferido de um ponto a outro com uma vazão desejada. (KENNEDY, 1993).

É de fundamental interesse que esses conjuntos de bombas apresentem alta confiabilidade e disponibilidade ao menor custo possível. Para isso, uma das técnicas de manutenção utilizadas é a análise de vibração (EISENMANN, 2005). Sem interromper a operação do equipamento, é possível analisar sua vibração e prever possíveis degradações e com isso programar paradas em períodos que causem o menor impacto à produção.

1.1 FORMULAÇÃO DO PROBLEMA

É sabido que variáveis de processo como, por exemplo, a vazão do oleoduto, influenciam no nível de vibração de um conjunto motobomba, podendo fazê-la aumentar ou diminuir, no entanto, quando o equipamento já está em operação essas variações não costumam ser quantificadas.

Por este motivo podem acontecer interpretações equivocadas quando não se leva em conta essas influências na análise de vibração, portanto é possível utilizar um modelo matemático para quantificar a influência das variáveis de processo.

1.2 JUSTIFICATIVA

Uma vez quantificadas as influências das principais variáveis de processo ao sistema, espera-se realizar uma análise de vibração mais consistente, diferenciando-

se potenciais falhas reais de elevações de vibração inofensivas causadas por alguma variação do processo. Pois, o nível de vibração real estará muito acima do previsto para aquelas condições operacionais.

1.3 OBJETIVOS

No estudo realizado para quantificar essa influência das variáveis de processo, por meio do delineamento de experimentos, espera-se atingir os objetivos descritos a seguir.

1.3.1 Objetivo Geral

Quantificar a influência das variáveis de processo no nível de vibração de um conjunto motobomba por meio do delineamento de experimentos.

1.3.2 Objetivos Específicos

Estudar um modelo matemático que entregue a previsão do nível de vibração esperado para o equipamento em cada condição de operação.

Utilizar o modelo para verificar se a operação que está sendo proposta levará o equipamento a vibrar em níveis prejudiciais, pois o valor previsto de vibração para essas condições operacionais será alto.

Além disso, utilizar o modelo para verificar se existe uma falha real do equipamento pois o nível de vibração real estará muito acima do previsto para aquelas condições operacionais.

1.4 METODOLOGIA

Será utilizada a técnica de Delineamento de Experimentos para elaboração do modelo matemático do nível de vibração esperado, através do resultado da combinação de vários níveis de operação para cada variável. De acordo com

(ANTONY, 2003), o Delineamento de Experimentos refere-se ao processo de planejar, projetar e analisar o experimento de modo que conclusões objetivas e válidas possam ser extraídas de maneira eficaz e eficiente. Para extrair conclusões estatisticamente consistentes do experimento, é necessário integrar métodos estatísticos simples e poderosos dentro da metodologia de delineamento experimental. O sucesso de qualquer delineamento industrial depende de um sólido planejamento, escolha adequada do tipo de delineamento, análise estatística dos dados e habilidade de trabalho em equipe.

Além disso, serão utilizadas ferramentas estatísticas para levantar curvas de distribuição para descobrir os pontos de operação comumente usados de cada variável de processo.

1.5 ESTRUTURA DO TRABALHO

Neste primeiro capítulo, procurou-se introduzir o tema apresentando de forma superficial o problema a ser estudado, a justificativa, objetivos e a metodologia que será utilizada.

No capítulo 2, será apresentado em detalhes a estação de bombeio que será objeto de estudo, com suas particularidades.

O capítulo 3 servirá de referencial teórico para a metodologia de Delineamento de Experimentos e outras ferramentas estatísticas utilizadas no trabalho.

O capítulo 4 fará a conexão entre os capítulos 2 e 3 apresentando a aplicação do referencial teórico na situação real descrita.

A análise dos resultados será discutida no capítulo 5.

2 APRESENTAÇÃO DO OBJETO DE ESTUDO

Neste capítulo serão apresentados os objetos de estudo, a estação de bombeio, o conjunto moto bomba bem como os softwares de apoio utilizados.

2.1 ESTAÇÃO DE BOMBEIO INTERMEDIÁRIA DE SANTA ISABEL

O estudo será realizado em uma estação intermediária de bombeio da TRANSPETRO localizada próxima ao município de Santa Isabel, no estado de São Paulo.

Uma estação intermediária de bombeio é uma instalação reduzida apenas com a função de recalque entre dois pontos dentro do mesmo oleoduto, neste caso, operada remotamente a partir do centro nacional de controle de operações da TRANSPETRO, localizado no Rio de Janeiro. A estação não possui tanques de armazenamento, nem estações de medição para faturamento ou alinhamentos para diversos oleodutos.

A estação possui quatro conjuntos motobomba que podem ser alinhadas em série, podendo operar até três bombas simultaneamente, interligando o oleoduto que leva petróleo do Terminal da TRANSPETRO em Guararema até a Refinaria da PETROBRAS em Paulínia (REPLAN), conforme Figura 1.

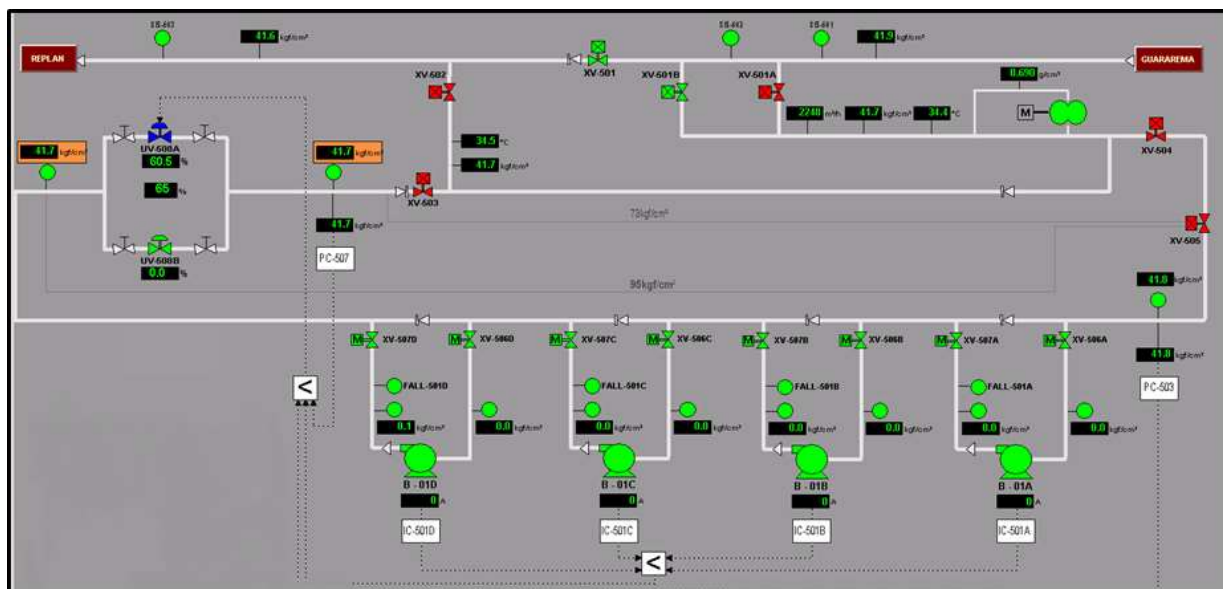


Figura 1 - Diagrama esquemático da Estação de Santa Isabel na tela do sistema supervisório
Fonte: Autoria própria.

A escolha da estação foi conveniente principalmente pela facilidade de registro das informações. Todos os dados utilizados foram registrados e armazenados no sistema supervisório.

2.2 CONJUNTO MOTOBOMBA

Cada conjunto motobomba é composto de um motor elétrico que aciona uma bomba centrífuga. Ambos possuem mancais de deslizamento e têm seus níveis de vibração monitorados por oito sensores do tipo “proximeter” (VIB1 a VIB8), dois em cada mancal defasados em 90 graus, conforme Figura 2.

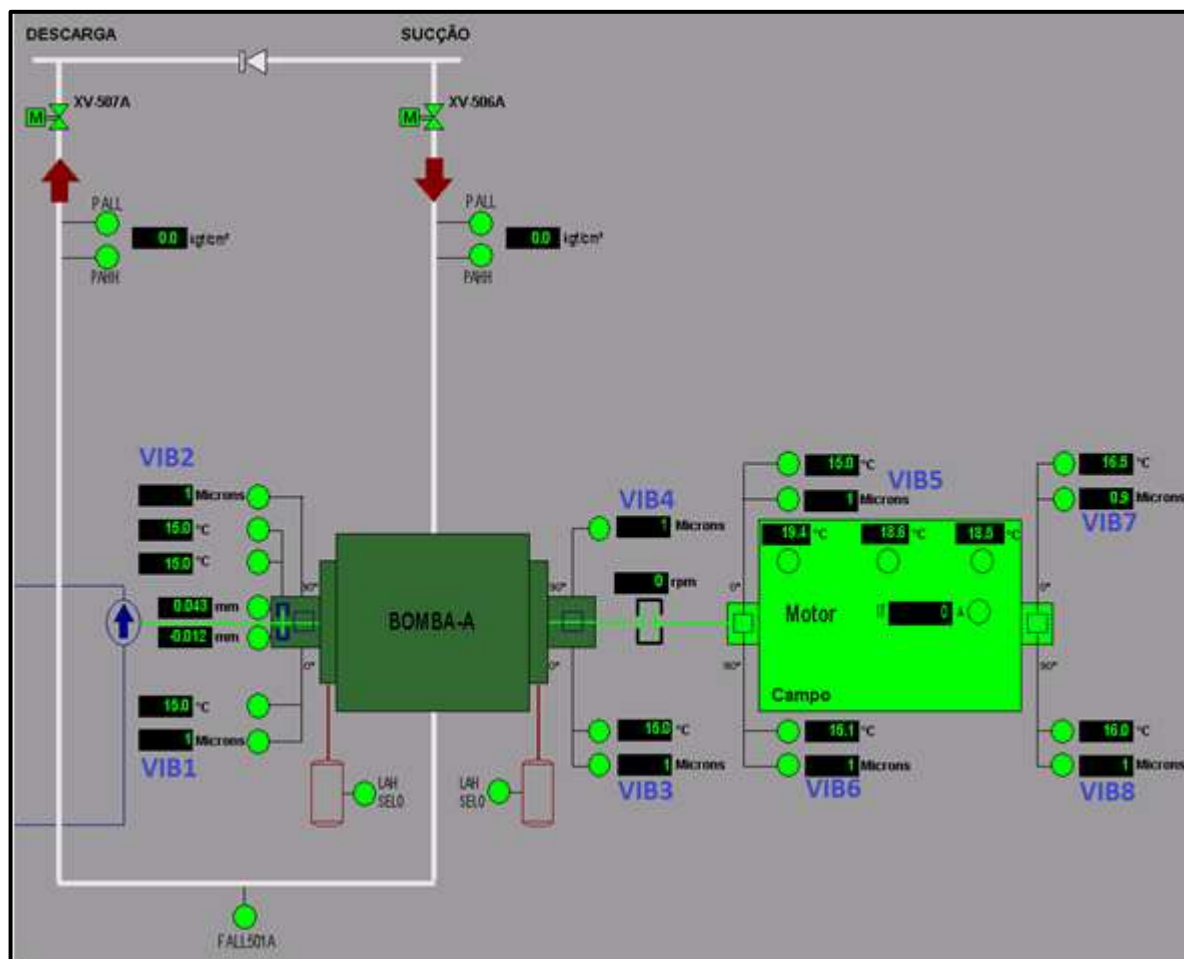


Figura 2 - Conjunto motobomba e pontos de monitoramento de vibração na tela do sistema supervisório
Fonte: Autoria própria.

Os mancais das bombas e dos motores são alimentados com óleo pressurizado para refrigeração dos mesmos e deslizamento do eixo. Cada conjunto possui uma unidade de lubrificação forçada (ULF) independente.

Os quatro conjuntos são idênticos, sendo que o motor D é um pouco mais potente que os demais. No Quadro 1 são apresentados os dados dos motores, sendo que os dados entre parênteses se referem especificamente ao motor D.

Característica	Valor
Potência (kW)	2300 (2500)
Corrente Nominal (A)	387.7 (419.3)
Tensão Nominal (V)	4000
IP/IN	5 (4.5)
Cosφ	0.89

Quadro 1 - Dados de placa dos motores da estação de bombeio

Fonte: Aatoria própria.

Para auxílio com os delineamentos de experimento e para o levantamento de curvas de distribuição estatística, serão utilizados, respectivamente os softwares DOE++ e Weibull++, ambos do fabricante Reliasoft.

3 EMBASAMENTO TEÓRICO

Neste capítulo serão apresentados os embasamentos teóricos necessários à compreensão do desenvolvimento do trabalho.

3.1 PRINCÍPIOS DE OPERAÇÃO DO CONJUNTO MOTOBOMBA

Uma variável que tem influência evidente no nível de vibração é a vazão. A Figura 3 mostra um exemplo desta influência no sistema que está sendo estudado. Neste exemplo, quando a vazão cai de cerca de 2800 para 2400 m³/h, a vibração na bomba aumenta de 25 para 45 micra. Essa operação em vazão reduzida durou cerca de 25 minutos, não sendo, portanto, apenas uma condição transitória.

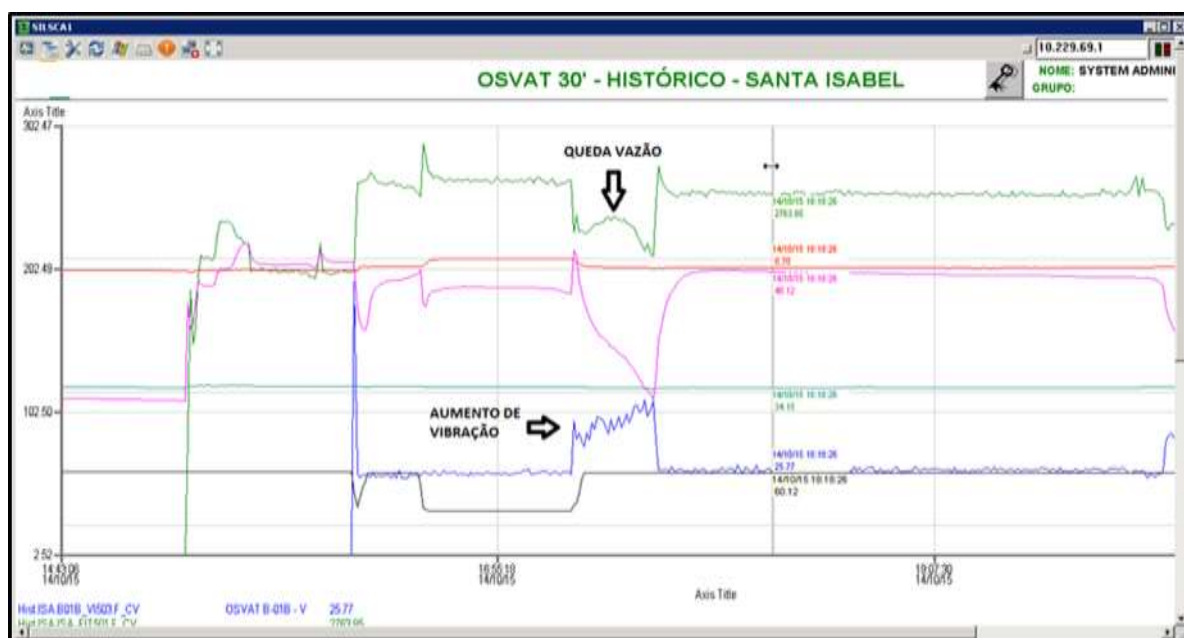


Figura 3 - Exemplo de Influência da vazão no nível de vibração na tela do sistema supervisório. Fonte: Autoria própria.

De acordo com a norma API 610, um fornecedor de bomba centrífuga deve apresentar na sua proposta, limites de operação para a bomba centrífuga. Os limites de vazão na qual uma bomba centrífuga pode operar são divididos em duas regiões, a primeira denominada de melhor eficiência ou região preferencial de operação, na qual a bomba apresenta baixa vibração, a outra denominada região permissível de operação cujos limites alto e baixo são definidos nas vazões onde a bomba atinge

níveis mais altos de vibração, porém ainda “aceitáveis”. A Figura 4 ilustra esse conceito. Outros fatores além da vibração como, por exemplo, aumento de temperatura por baixa vazão ou NPSH3 por alta vazão podem ditar uma região permissível de operação mais estreita.

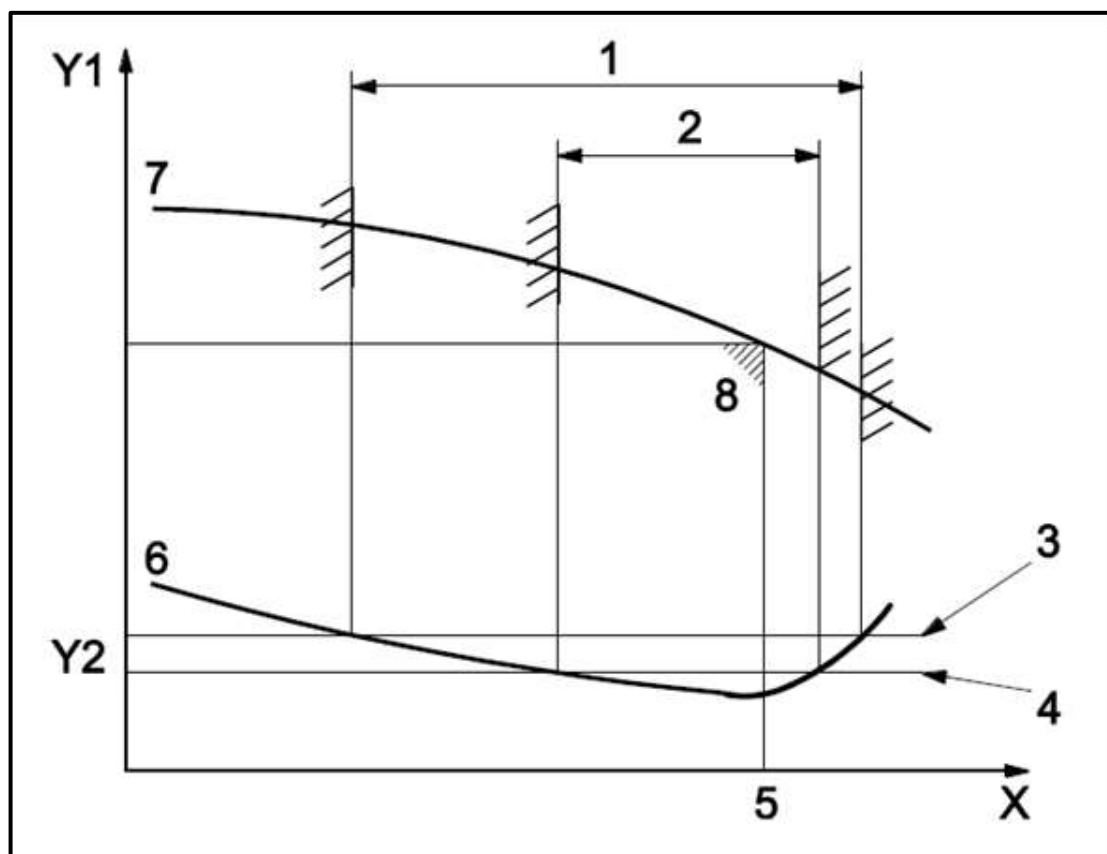


Figura 4 - Curvas Head x Vazão e Vibração x Vazão
Fonte: API610 (2011, p.48)

- X – Vazão
- Y1 – Head
- Y2 – Vibração
- 1 – Região permissível de operação
- 2 – Região preferencial de operação
- 3 – Limite máximo de vibração permitido nos limites de vazão
- 4 – Limite básico de vibração
- 5 – Ponto de melhor eficiência (BEP – Best Efficiency Point) em vazão
- 6 – Curva típica de vibração versus vazão mostrando a máxima vibração permitida
- 7 – Curva head-vazão

8 – Ponto de melhor eficiência (BEP – Best Efficiency Point) em head e vazão

Segundo (EISENMANN, 2005), uma boa estratégia de manutenção para grandes equipamentos dinâmicos é a monitoração contínua dos níveis globais de vibração em vários pontos associado com um sistema de proteção automático. Além disso, coletas de dados mais detalhados devem ser realizadas periodicamente para se descobrir tendências de falha com antecedência.

3.2 INTRODUÇÃO AO DELINEAMENTO DE EXPERIMENTOS

De acordo com (RELIASOFT, 2015) O delineamento e análise de experimentos (DOE – do inglês, “Design Of Experiments”), consiste em entender os efeitos de diferentes variáveis em uma outra variável. Em termos técnicos, o objetivo é estabelecer uma relação de causa e efeito entre um número de variáveis independentes e uma variável dependente de interesse. A variável dependente, no contexto do DOE, é chamada de resposta e as variáveis independentes são chamadas fatores. Experimentos são executados com diferentes valores para os fatores, chamados níveis. Cada execução de um experimento envolve a combinação de níveis dos fatores investigados, e cada uma dessas combinações é chamada de um tratamento. Quando um mesmo número de respostas são obtidas para cada tratamento em um experimento, diz-se que o delineamento do experimento é balanceado. Repetidas execuções de um mesmo tratamento são chamadas de replicações.

O número de tratamentos de um experimento é determinado com base no número de níveis dos fatores investigados. Por exemplo, se um experimento envolve dois fatores, sendo que o primeiro possui m níveis e o segundo n níveis, então $m \times n$ tratamentos são possíveis de serem executados, e o experimento é um delineamento fatorial $m \times n$. Se todas as $m \times n$ combinações forem executadas, então o experimento é um fatorial completo. Se apenas alguns dos $m \times n$ tratamentos forem executados, então o experimento é um fatorial fracionado. Num fatorial completo, todos os fatores e suas interações podem ser investigados, ao

passo que nos fatoriais fracionados, pelo menos algumas interações não são consideradas pois alguns tratamentos não são executados.

É possível notar que o tamanho de um experimento aumenta rapidamente com o aumento da quantidade de fatores (ou da quantidade de níveis dos fatores). Por exemplo, se 2 fatores a 3 níveis cada um serão usados, 9 ($3 \times 3 = 9$) tratamentos diferentes serão necessários para um fatorial completo. Se um terceiro fator com 3 níveis for adicionado, 27 ($3 \times 3 \times 3 = 27$) tratamentos serão necessários, e 81 ($3 \times 3 \times 3 \times 3 = 81$) tratamentos caso um quarto fator com 3 níveis for adicionado. Se apenas dois níveis forem utilizados para cada fator, então para o caso de 4 fatores, 16 ($2 \times 2 \times 2 \times 2 = 16$) tratamentos serão necessários. Por esta razão, muitos experimentos são restritos a 2 níveis. Usar um fatorial fracionado reduz ainda mais a quantidade de tratamentos necessários.

3.2.1 TIPOS DE DOE

3.2.1.1 Para comparação: Delineamento de um fator.

Neste tipo de delineamento, apenas um fator é investigado e o objetivo é determinar se a resposta é significativamente influenciada para diferentes níveis do fator. O fator pode ser qualitativo ou quantitativo. No caso de fatores qualitativos (tipo de fornecedor, tipo de material, etc), nenhuma extrapolação (previsão, por exemplo) pode ser feita além dos níveis testados, e apenas poderá ser determinado o efeito do fator na resposta. Por outro lado, dados de experimentos onde o fator é quantitativo (tal como temperatura, tensão, corrente, etc) pode ser usado tanto para investigar o efeito como para predição, desde que haja dados suficientes disponíveis (RELIASOFT, 2015).

3.2.1.2 Para triagem de fatores: Delineamentos fatoriais.

Nos delineamentos fatoriais, múltiplos fatores podem ser investigados simultaneamente durante o experimento. Assim como no delineamento de um fator, fatores qualitativos e/ou quantitativos podem ser considerados. O objetivo destes

delineamentos é identificar os fatores que tem um efeito significativo na resposta, além de investigar o efeito das interações entre os fatores (dependendo do delineamento utilizado). É possível realizar previsões quando existem fatores quantitativos, mas deve-se tomar cuidado pois alguns delineamentos são muito limitados como opção para obter um modelo de previsão. Por exemplo, no delineamento de dois níveis apenas uma relação linear pode ser obtida entre a resposta e os fatores, que pode ou não ser realista (RELIASOFT, 2015).

3.2.1.2.1 Delineamentos fatoriais completos

Nos delineamentos fatoriais completos, os fatores podem ter diferentes tipos de níveis e podem ser quantitativos ou qualitativos.

3.2.1.2.2 Delineamentos fatoriais de dois níveis

Nestes delineamentos, todos os fatores devem ter apenas dois níveis. Reduzindo o número de níveis a dois e executando um fatorial completo reduz-se o número de execuções necessárias (comparado ao delineamento fatorial completo), além de ser possível a investigação de todos os fatores e suas interações. Se todos os fatores forem quantitativos, então os dados deste experimento poderão ser usados para realizar previsões, desde que um modelo linear seja apropriado para a resposta (uma vez que apenas dois níveis são utilizados, não é possível modelar curvatura) (RELIASOFT, 2015).

3.2.1.2.3 Delineamento fatorial fracionado de dois níveis

Este é um caso especial do delineamento de dois níveis, onde não são considerados todas as combinações de níveis, podendo-se escolher quais combinações serão excluídas. Baseado nas exclusões, algumas interações não poderão ser investigadas (RELIASOFT, 2015).

3.2.1.2.4 Delineamento Plackett-Burman

Este é um caso especial do delineamento fatorial fracionado de dois níveis, proposto por R. L. Plackett e J. P. Burman (1946), onde apenas poucas execuções específicas são escolhidas para se investigar apenas os efeitos principais, sem analisar interações (RELIASOFT, 2015).

3.2.1.2.5 Matrizes ortogonais de Taguchi

As matrizes ortogonais de Taguchi são delineamentos altamente fracionados, usados para estimar os principais efeitos usando poucas execuções. Estes delineamentos não são aplicáveis apenas a fatoriais de dois níveis, mas também para fatores com mais de dois níveis. Também podem ser usados para investigar os principais efeitos em experimentos onde os fatores não possuem o mesmo número de níveis (RELIASOFT, 2015).

3.2.1.3 Para otimização: Delineamentos com superfície de reposta

Estes são delineamentos especiais para determinar os ajustes dos fatores de modo a atingir um valor ótimo de resposta (RELIASOFT, 2015).

3.2.1.4 Para robustez do processo: Delineamento de parâmetros robustos

O famoso delineamento robusto de Taguchi é para o delineamento de parâmetros robustos. É usado para que o projeto de um produto ou processo seja imune a fatores de ruído (RELIASOFT, 2015).

3.2.2 PRINCÍPIO IMPORTANTES DE DOE

Segundo (ANTONY, 2003), os três princípios do delineamento de experimentos, aleatoriedade, replicação e blocagem podem ser utilizados nos experimentos para aumentar a sua eficiência. Esses princípios são aplicados para reduzir ou mesmo remover os vieses experimentais. É importante notar que grandes vieses experimentais podem resultar em ajustes ótimos errados ou em alguns casos podem mascarar o efeito dos fatores realmente significativos. Dessa forma uma

oportunidade de obter um melhor entendimento do processo pode se perder, é um elemento fundamental para a melhoria do processo pode ser negligenciado.

3.2.2.1 Aleatoriedade

Vive-se num mundo não-estacionário, um mundo no qual fatores de ruído (ou distúrbios externos) nunca permanecem parados. Por exemplo, a fabricação de uma peça de metal é uma operação envolvendo pessoas, máquinas, medições, meio-ambiente, etc. As peças das máquinas não são entidades fixas, elas estão sofrendo desgaste ao longo do tempo e sua precisão não é constante ao longo do tempo. A atitude das pessoas que operam as máquinas varia de tempos em tempos. Quando se acredita que um processo é estável, não há necessidade de se aleatorizar as execuções experimentais. Por outro lado, se não é possível determinar a estabilidade do processo, a aleatoriedade é fundamental para não conduzir o experimento a enganos. Caso o processo é completamente instável, a aleatoriedade pode inviabilizar a execução do experimento e neste caso é melhor buscar métodos de controle de processo para trazê-lo a uma condição básica de controle estatístico (ANTONY, 2003).

Enquanto se conduz um experimento industrial, surgem fatores tal como queda de energia, erros operacionais, flutuações na temperatura ambiente e umidade, variações de matéria-prima que podem influenciar a performance do processo pois são caras ou difíceis de controlar. Tais fatores podem afetar negativamente os resultados e, portanto, devem ser minimizados ou removidos do experimento. A aleatorização é uma das maneiras de se reduzir o efeito de erros experimentais. Através de uma aleatorização bem feita, é possível cancelar os efeitos dos fatores de ruídos que possam estar presentes no processo. Em outras palavras, a aleatorização pode garantir que todos os níveis de um fator tenham igual chance de serem afetados pelos ruídos (ANTONY, 2003).

3.2.2.2 Replicação

Replicação é o processo de realizar as execuções numa sequência aleatória. Replicação são repetições de um experimento inteiro ou uma parte dele,

sob mais de uma condição. Duas propriedades são importantes. A primeira é que permite ao experimentador obter uma estimativa do erro experimental, a segunda é que permite obter uma estimativa mais precisa do efeito do fator ou da interação. Se o número de replicações é igual a um, não será possível tirar conclusões satisfatórias sobre os efeitos dos fatores ou suas interações.

Em alguns casos, as replicações podem resultar num aumento substancial de tempo e custo para conduzir um experimento, portanto seu uso deve ser justificável.

Em alguns lugares utilizam-se os termos “repetição” e “replicação” indistintamente. Tecnicamente, é um erro. Na repetição as condições externas são exatamente iguais, ao passo que na replicação, alguma condição deve ser diferente (ANTONY, 2003).

3.2.2.3 Blocagem

Blocagem é um método de se eliminar efeitos de variações externas devido a fatores de ruído e assim melhorar a eficiência do delineamento. O principal objetivo é eliminar fontes indesejadas de variabilidade tais como turnos ou horários diferentes. A ideia é agrupar execuções semelhantes em blocos. Geralmente, um bloco é um conjunto de condições experimentais relativamente homogêneas. Os blocos podem ser lotes de matéria-prima, operadores diferentes, fornecedores diferentes, etc. Observações coletadas sob condições semelhantes (mesmo turno, mesmo horário) devem pertencer ao mesmo bloco. A variabilidade entre blocos deve ser eliminada do erro experimental, o que leva a um aumento na precisão do experimento (ANTONY, 2003).

4 DESENVOLVIMENTO DO TRABALHO

Pela dificuldade de se realizar várias modificações nos parâmetros de operação de um oleoduto num curto espaço de tempo, utilizou-se dados de histórico para o levantamento dos resultados dos delineamentos deste trabalho. Portanto, ao se delinear os experimentos, ao invés de se programar a realização das execuções, buscou-se os resultados em histórico de operações recentes.

4.1 APLICAÇÃO DA TÉCNICA DE DOE NO PROBLEMA ESTUDADO

A fim de obedecer aos princípios da aleatoriedade, replicação e blocagem, alguns cuidados foram tomados

4.1.1 Aleatoriedade

Foram aproveitados, sempre que possível, dados de dias diferentes, de turnos diferentes a fim de se aplicar a aleatoriedade.

4.1.2 Replicação

Foi utilizado um volume grande de dados. Registros de quase um ano de operação desde setembro de 2015 até maio de 2016, o que permitiu que fossem realizadas muitas replicações nos delineamentos que visavam buscar um modelo para predição.

4.1.3 Blocagem

Foram eliminados dados próximos das partidas das bombas, a fim de se evitar respostas de transientes que pudessem distorcer o modelo. Buscou-se montar um modelo que reflita o regime permanente de operação e não situações transitórias.

Também foram excluídos dados onde a válvula controladora de vazão da estação se encontrava fora do comportamento normal. Descobriu-se que em condição de regime permanente a válvula passa a maior parte do tempo com abertura de 65%, portanto todos os dados utilizados foram de situações onde a válvula apresentava esse percentual de abertura.

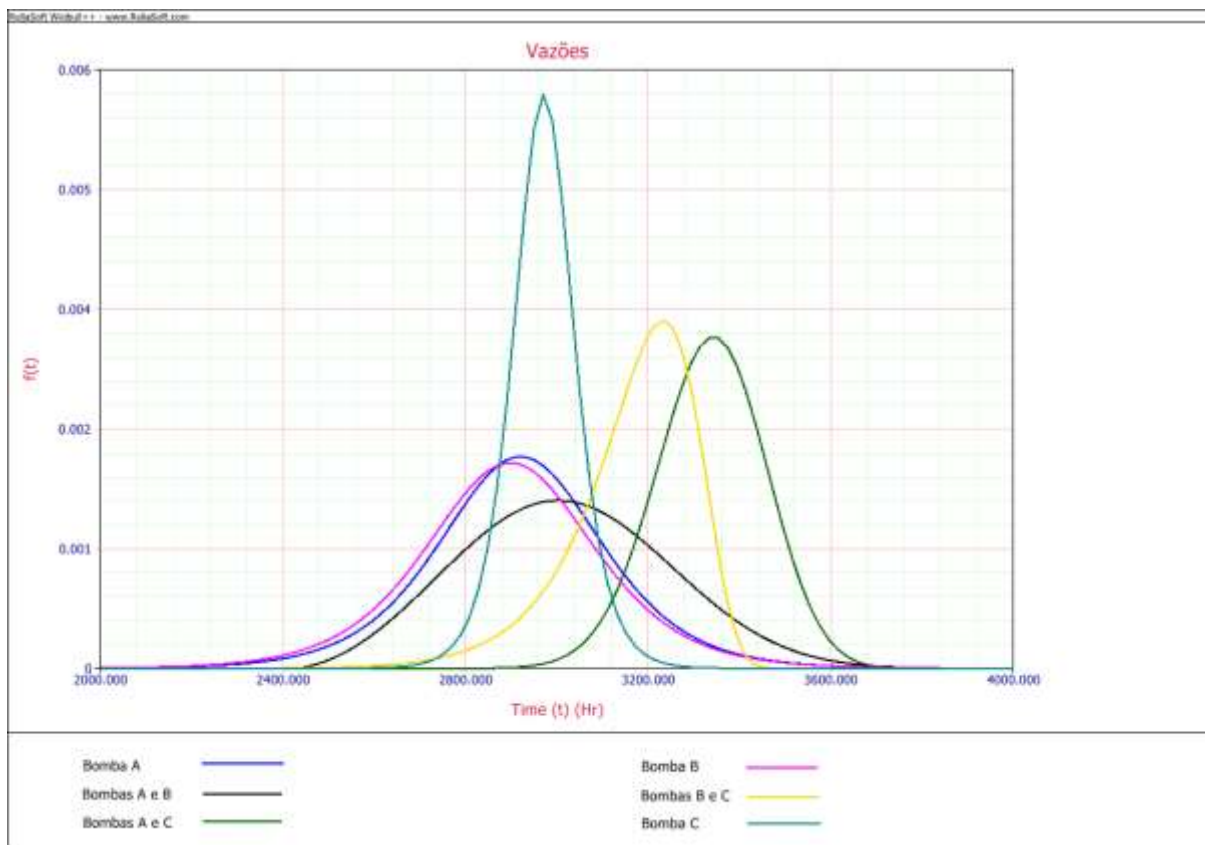
4.1.4 Determinação dos limites de variação de cada fator

Todos os fatores utilizados em todos os delineamentos deste trabalho são quantitativos (pressão, vazão, densidade). No início não se tinha ideia dos limites de variação de cada fator, portanto foi necessário o levantamento destes limites.

Optou-se pelo uso do software Weibull++ da Reliasoft a fim de se levantar distribuições estatísticas para a variação de cada fator e assim ter uma ideia dos pontos onde mais comuns durante a operação.

A

mostra como exemplo as distribuições de vazão para diferentes cenários operando-se uma ou duas bombas. Para isto, no eixo “x” a informação de tempo deve ser lida como vazão.



**Figura 5 - Vazões para combinação de 1 ou 2 bombas em operação.
Fonte: Autoria própria.**

Já na Figura 6, é possível visualizar na distribuição de vazão para todos os casos onde se operaram uma ou duas bombas que a média de vazão é de quase $3000 \text{ m}^3/\text{h}$.

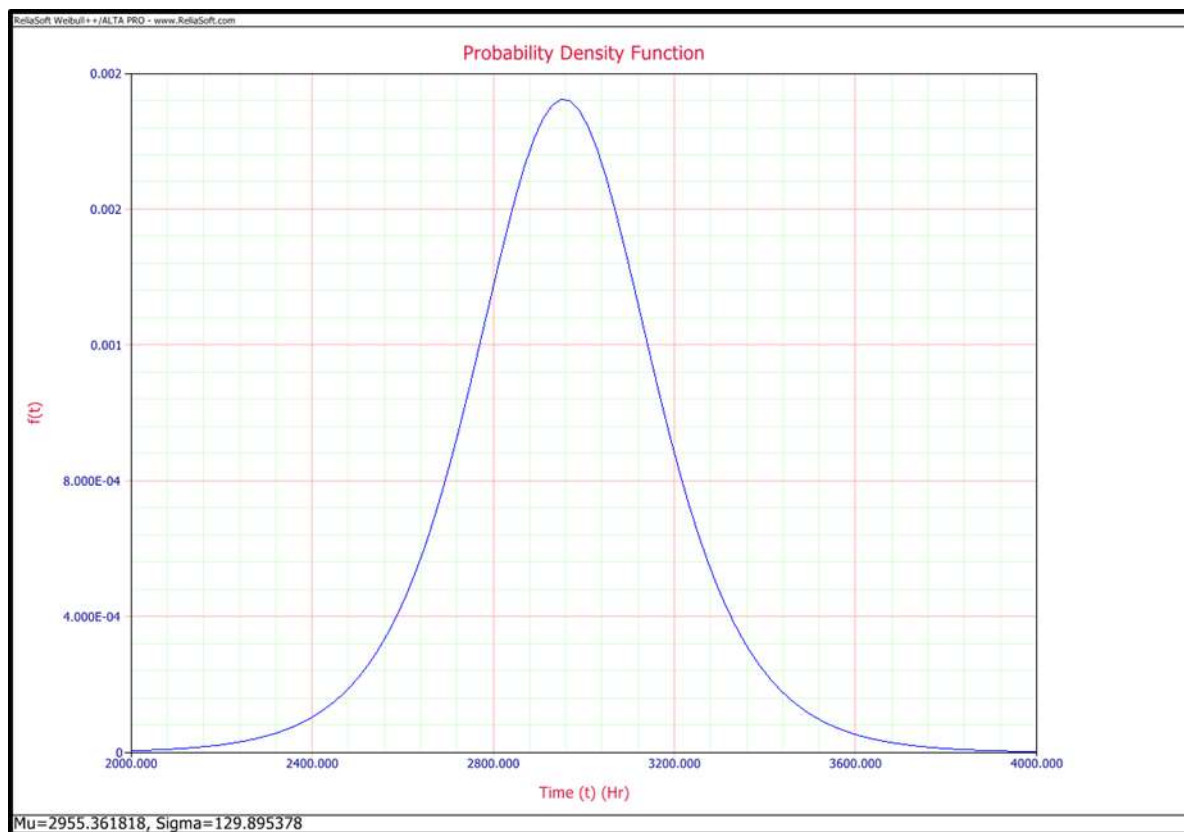


Figura 6 - Distribuição de vazão geral
Fonte: Autoria própria.

Essa técnica foi usada para se determinar os limites de todas as variáveis estudadas conforme ilustra a Figura 7.

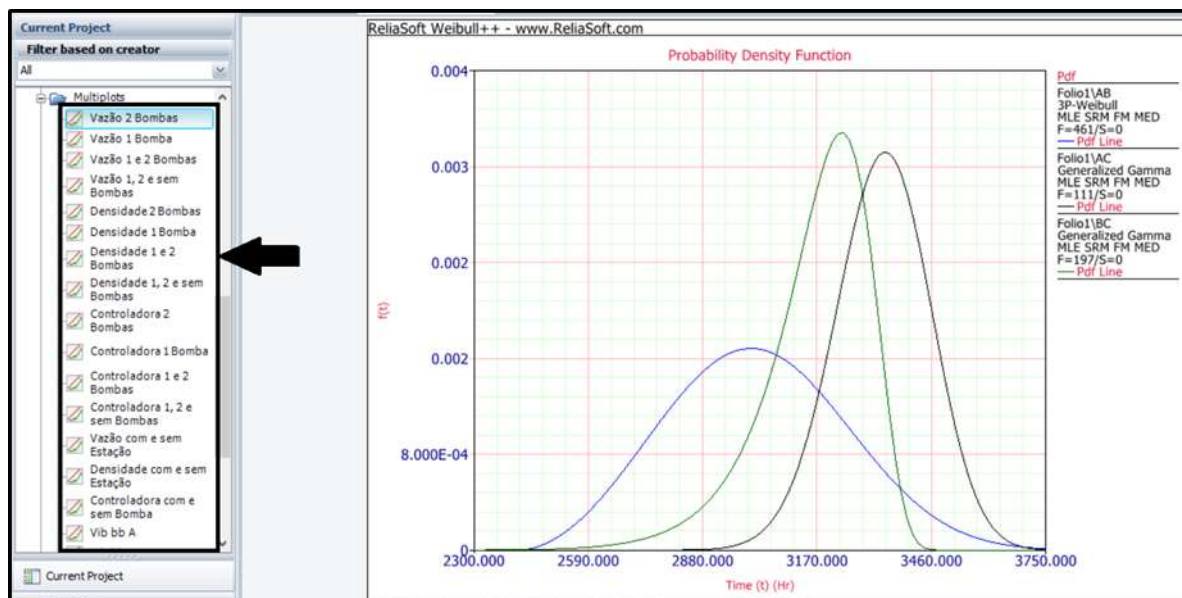


Figura 7 - Determinação dos limites das variáveis no Weibull++
Fonte: Autoria própria.

Após todos os levantamentos, verificou-se que a bomba A era a mais rica em informações, pois tinha operado mais vezes em cenários mais variados, sendo a escolhida para fornecer os dados nos delineamentos.

4.1.5 Delineamento de triagem

Como delineamento de triagem, a fim de se identificar a relevância dos fatores envolvidos, optou-se por um delineamento fatorial de 2 níveis com 3 fatores: vazão, densidade e diferencial de pressão na bomba. Entende-se como diferencial de pressão a diferença de pressão do produto entre a descarga e a sucção da bomba, que está relacionada com a quantidade de energia imprimida pela bomba ao produto.

Deveria-se buscar oito respostas para cada execução, sendo cada um dos oito pontos de vibração monitorados conforme ilustrado na Figura 2.

A grande dificuldade de se realizar esse delineamento é que conforme buscavam-se combinações de várias densidade e diferencial de pressão, obtém-se limites de vazões diferentes para cada combinação, resultando numa faixa muito pequena onde é possível variar os fatores. A Tabela 1 mostra as vazões mínimas e máximas encontradas para diferentes combinações de densidade e pressão, ilustrando essa dificuldade.

Densidade	Pressão Diferencial	Vazão Mínima	Vazão Máxima
0.72	17	2871	3169
0.72	18	2753	3224
0.72	19	2503	3060
0.72	20	2260	2911
0.74	17	2962	3257
0.74	18	2820	3218
0.74	19	2613	3029
0.74	20	2643	2829
0.76	17	2868	3233
0.76	18	2658	3315
0.76	19	2522	2996
0.76	20	2537	2817
0.78	17	2880	3276
0.78	18	2753	3084
0.78	19	2704	3063
0.78	20	2209	2820

Tabela 1 - Vazões possíveis para combinações de densidade e diferencial de pressão
Fonte: Autoria própria.

Foi utilizado o software DOE++ da Reliasoft para realizar o delineamento conforme mostrado na Figura 8.

	Q:Vazão (m ³ /h)	D:Densidade (g/cm ³)	Pdif:Pressão Diferencial (Kof/cm ²)	Vib1 (um) <input checked="" type="checkbox"/>	Vib2 (um) <input type="checkbox"/>	Vib3 (um) <input type="checkbox"/>	Vib4 (um) <input type="checkbox"/>	Vib5 (um) <input type="checkbox"/>	Vib6 (um) <input type="checkbox"/>	Vib7 (um) <input type="checkbox"/>	Vib8 (um) <input type="checkbox"/>
1	2820	0.73	18.48	25.48	23.01	28.87	27.47	34.35	44.14	13.18	26.94
2	2820	0.73	19.53	24.8	23.45	25.68	26.07	31.2	36.19	12.06	25.73
3	2820	0.75	18.48	24.8	23.55	26.45	25.97	33.28	39.39	13.18	25.63
4	2820	0.75	19.53	20.11	24.71	21.56	22.19	38.52	51.55	13.03	23.84
5	2920	0.73	18.48	25.82	24.27	27.18	25.92	33.43	44.47	13.85	25.09
6	2920	0.73	19.53	23.25	26.02	24.71	24.95	34.93	45.83	12.79	26.84
7	2920	0.75	18.48	20.69	24.22	23.64	24.42	33.28	42.3	14.1	24.47
8	2920	0.75	19.53	21.95	26.84	24.03	26.07	33.67	43.02	12.21	27.18

Figura 8 - Delineamento fatorial de dois níveis no DOE++
Fonte: Autoria própria.

Neste delineamento praticamente não se observou nenhuma correlação, a exemplo da Figura 9 que mostra o gráfico de Pareto para o ponto Vib1.

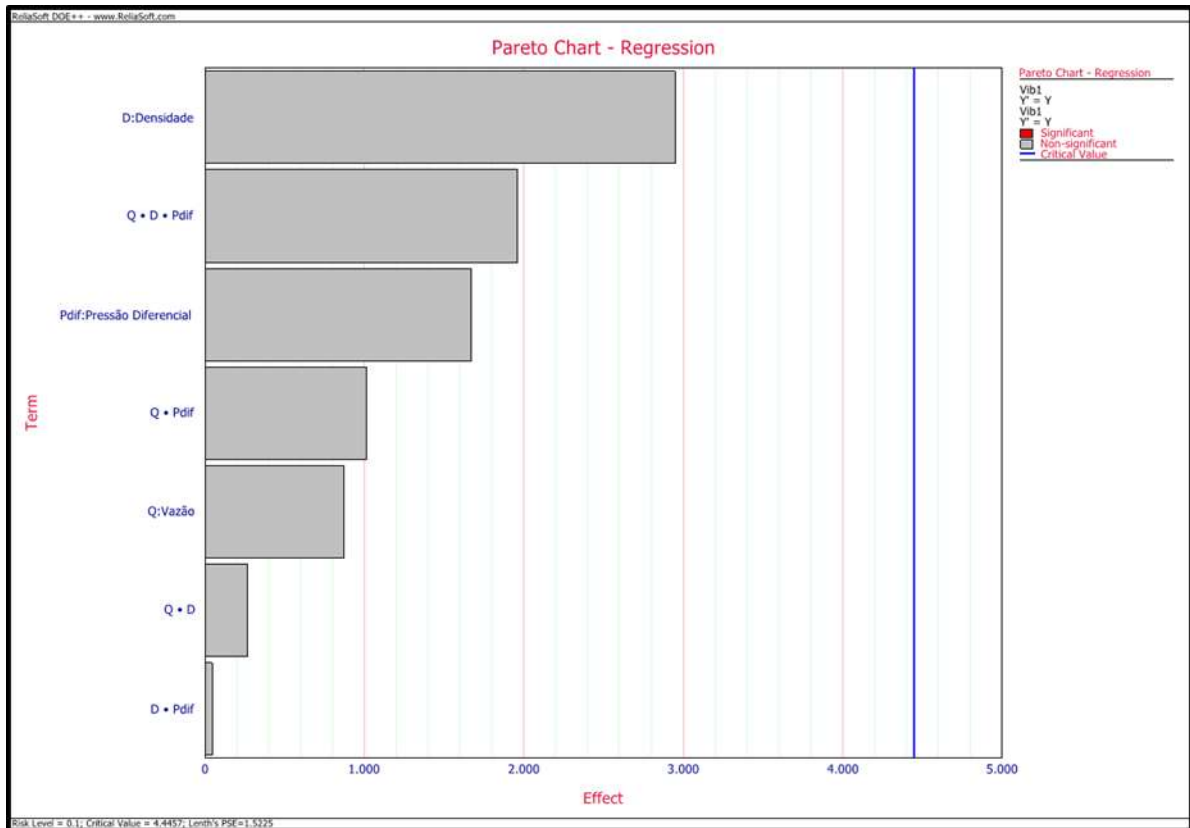


Figura 9 - Gráfico de Pareto para o ponto Vib1 no DOE++
Fonte: Autoria própria.

Isso provavelmente aconteceu pelos limites reduzidos que foram utilizados em cada fator. Não foi possível encontrar uma faixa de valores considerável para variar os 3 fatores simultaneamente.

Como alternativa, optou-se por retirar a vazão da triagem, uma vez que essa variável já é comprovadamente importante no nível de vibração do conjunto motobomba. Com isso realizou-se um fatorial completo apenas com densidade e diferencial de pressão com quatro níveis para cada fator, resultando em 16 execuções conforme ilustra a Figura 10.

	D:Densidade	P:Pressão Diferencial (kgf/cm2)	Vib3	<input checked="" type="checkbox"/>
1	0.74	19	25.89	
2	0.7	19	23.5	
3	0.72	18	24.47	
4	0.76	19	26.54	
5	0.76	17	26.5	
6	0.74	20	23.74	
7	0.7	20	24.76	
8	0.74	18	26.96	
9	0.7	17	26.91	
10	0.74	17	29.41	
11	0.72	20	22.63	
12	0.76	18	26.8	
13	0.72	17	30.25	
14	0.76	20	25.17	
15	0.72	19	24.58	
16	0.7	18	26.82	

Figura 10 - Fatorial completo Densidade e Pressão Diferencial no DOE++
Fonte: Autoria própria.

Foram executados oito fatoriais iguais a este, um para cada ponto de vibração monitorado.

Obteve-se uma forte correlação em quatro, dos oito pontos de vibração. Curiosamente foram os 4 pontos mais próximos do acoplamento do conjunto, dois na bomba (Vib3 e Vib4) e dois no motor (Vib5 e Vib6). Outro fato interessante é que os dois pontos da bomba se correlacionaram com o diferencial de pressão (Figura 11 e Figura 12) ao passo que os dois pontos do motor se correlacionaram com a densidade (Figura 13 e Figura 14).

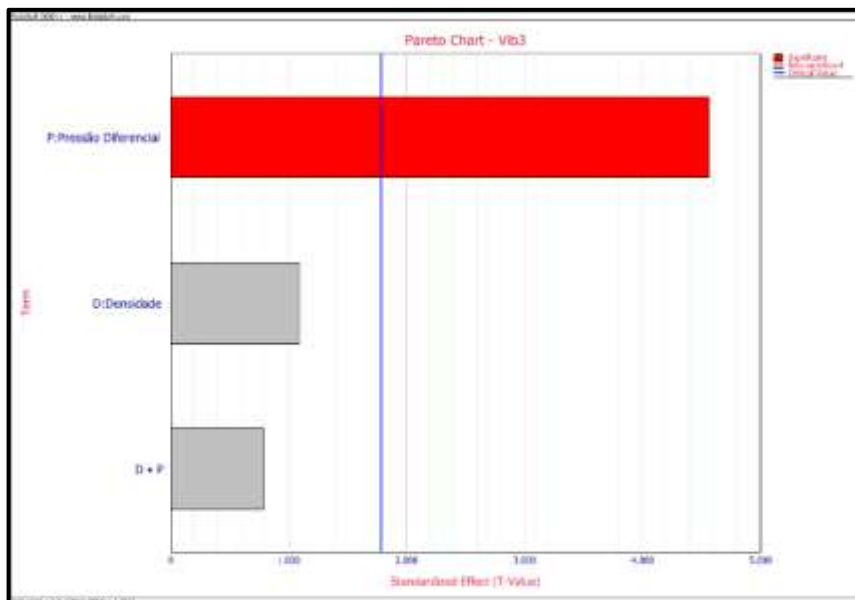


Figura 11 - Gráfico de Pareto Vib3 no DOE++
Fonte: Autoria própria.

No gráfico de Pareto do ponto Vib3 percebe-se que o fator que mais influencia a vibração é o diferencial de pressão (P), visivelmente mais influente do que a densidade (D) ou a interação entre densidade e pressão (D * P).

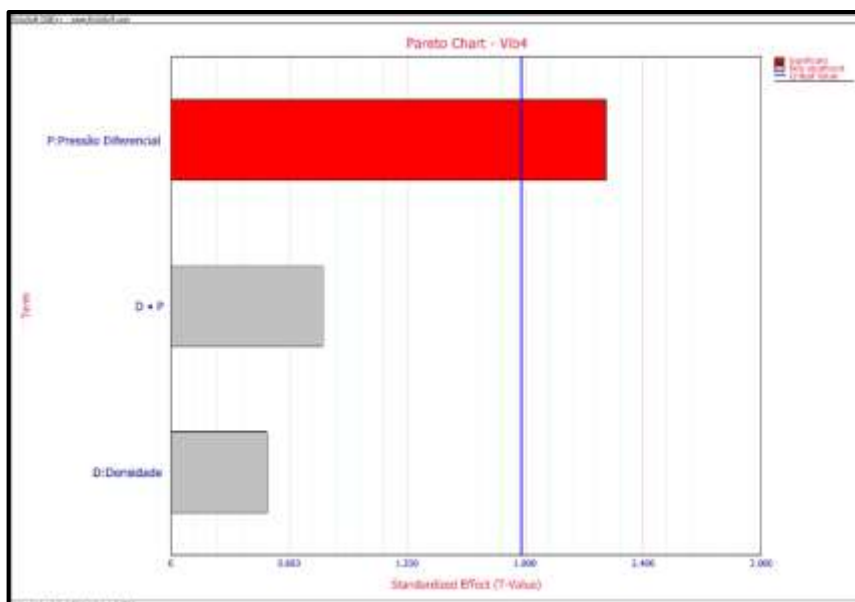


Figura 12 - Gráfico de Pareto Vib4 no DOE++
Fonte: Autoria própria.

No gráfico de Pareto do ponto Vib4 também se percebe a alta influência do diferencial de pressão (P), semelhante ao ponto Vib3.

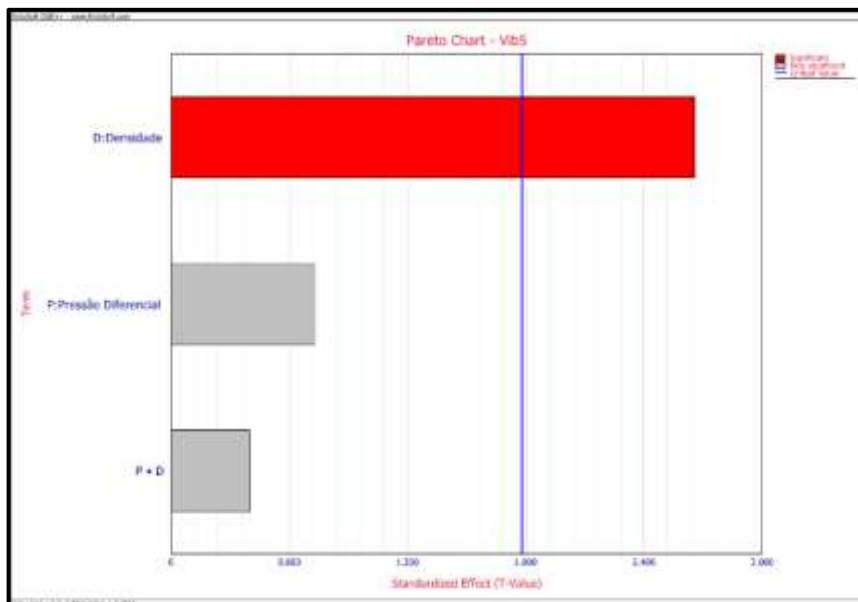


Figura 13 - Gráfico de Pareto Vib5 no DOE++
Fonte: Autoria própria.

Já no gráfico do ponto Vib5, é nítida a forte influência da densidade quando comparada com o diferencial de pressão ou a interação entre pressão e densidade.

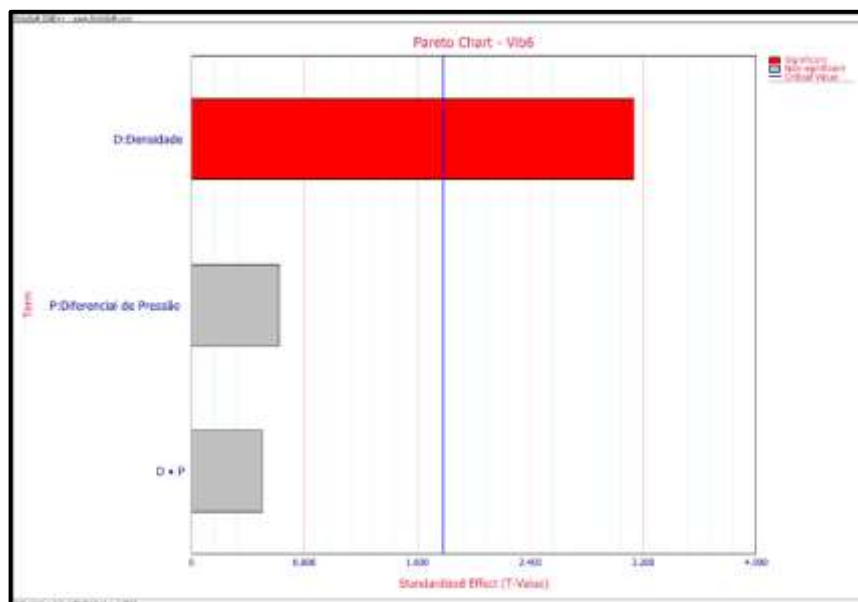


Figura 14 - Gráfico de Pareto Vib6 no DOE++
Fonte: Autoria própria.

Semelhante ao ponto Vib5, o ponto Vib6 também é mais influenciado pela densidade do produto que está sendo bombeado.

4.1.6 Delineamento para aprofundamento dos resultados

Após a constatação das correlações da bomba com diferencial de pressão e do motor com a densidade, decidiu-se trazer de volta a vazão para agora assim trata-la interagindo com os outros fatores.

Dessa maneira outros dois delineamentos foram realizados, um para o motor e outro para a bomba. O resumo do delineamento da bomba está descrito na Tabela 2, Tabela 3 e Tabela 4. O resumo do delineamento do motor está descrito na Tabela 5, Tabela 6 e Tabela 7. Desta vez com uma quantidade maior de dados, sendo possíveis 108 execuções para a bomba e 240 para o motor.

Propriedades das Respostas	
Nome	Unidade
Vib3	micra
Vib4	micra

Tabela 2 - Respostas delineamento bomba
Fonte: Autoria própria.

As respostas são os níveis de vibração nos pontos Vib3 e Vib4 medidos em micra.

Propriedades dos Fatores							
Abreviação	Nome	Unidade	Tipo	Número de Níveis	Nível 1 (baixo)	Nível 2	Nível 3 (Alto)
Q	Vazão	m ³ /h	Quantitativo	3	2700	2800	2900
P	Diferencial de Pressão	Kgf/cm ²	Quantitativo	3	18.5	19.5	20

Tabela 3 - Fatores delineamento bomba
Fonte: Autoria própria.

Foram utilizados três níveis para cada fator.

Ajustes Adicionais	
Execuções Únicas	9
Replicações	12
Total de Execuções	108

Tabela 4 - Resumo delineamento bomba
Fonte: Autoria própria.

Foram utilizadas nove combinações (3x3) com doze replicações, totalizando cento e oito execuções.

Propriedades das Respostas	
Nome	Unidade
Vib5	micra
Vib6	micra

Tabela 5 - Respostas delineamento motor
Fonte: Autoria própria.

As respostas para o motor são os níveis de vibração nos pontos Vib5 e Vib6 também medidos em micra.

Propriedades dos Fatores								
Abreviação	Nome	Unidade	Tipo	Número de Níveis	Nível 1 baixo	Nível 2	Nível 3	Nível 4 alto
Q	Vazão	m ³ /h	Quantitativo	4	2700	2800	2900	3000
D	Densidade	g/cm ³	Quantitativo	4	0.7	0.72	0.74	0.76

Tabela 6 - Fatores delineamento motor
Fonte: Autoria própria.

Foi possível utilizar quatro níveis para cada fator.

Ajustes Adicionais	
Execuções Únicas	16
Replicações	15
Total de Execuções	240

Tabela 7 - Resumo delineamento motor
Fonte: Autoria própria.

Foram utilizadas dezesseis combinações (4x4) com quinze replicações, totalizando duzentos e quarenta execuções.

Além das quatro correlações descobertas no delineamento anterior, confirmou-se as correlações dos quatro pontos também com a vazão ou ao menos com a interação da vazão com o outro fator como no caso de Vib6. Assim ilustra os gráficos de Pareto da Figura 15, Figura 16, Figura 17 e Figura 18.

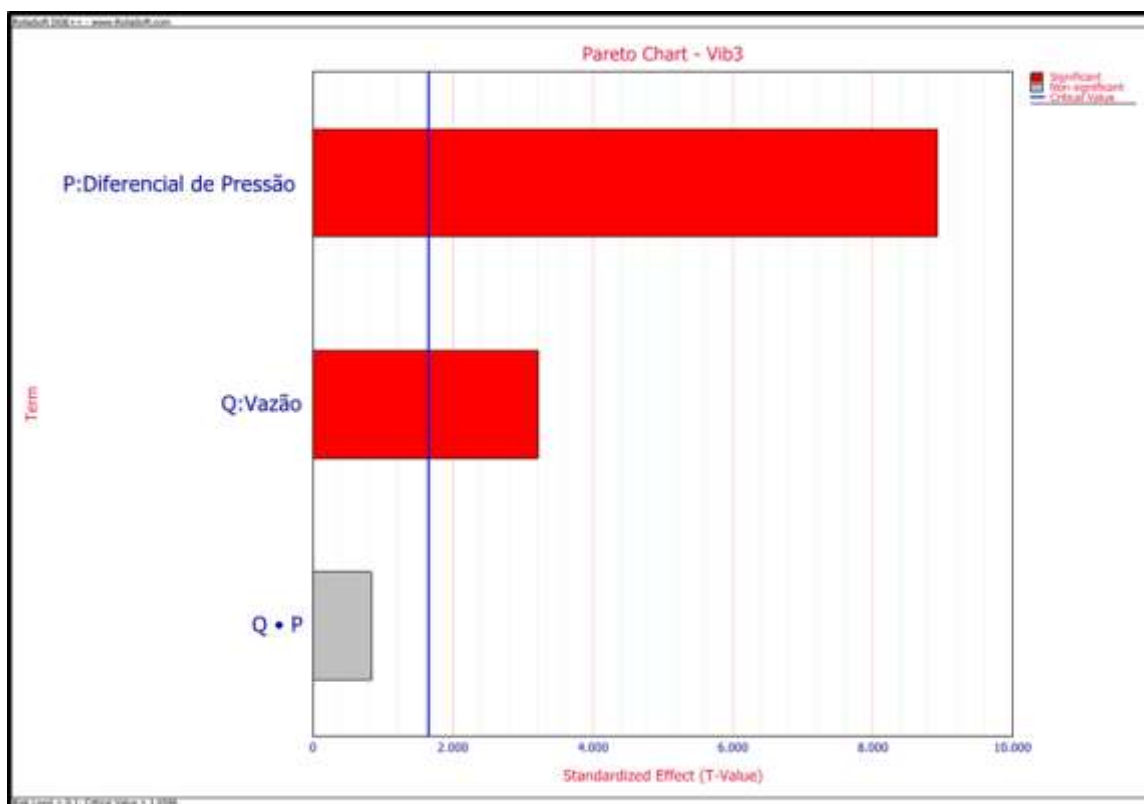


Figura 15 - Pareto Vib3 no DOE++
Fonte: Autoria própria.

No gráfico de Pareto do ponto Vib3 percebe-se que o fator que mais influencia a vibração é o diferencial de pressão (P). A vazão (Q) também influencia significativamente o nível de vibração. Também se percebe que não há interação significativa entre os fatores (Q * P).

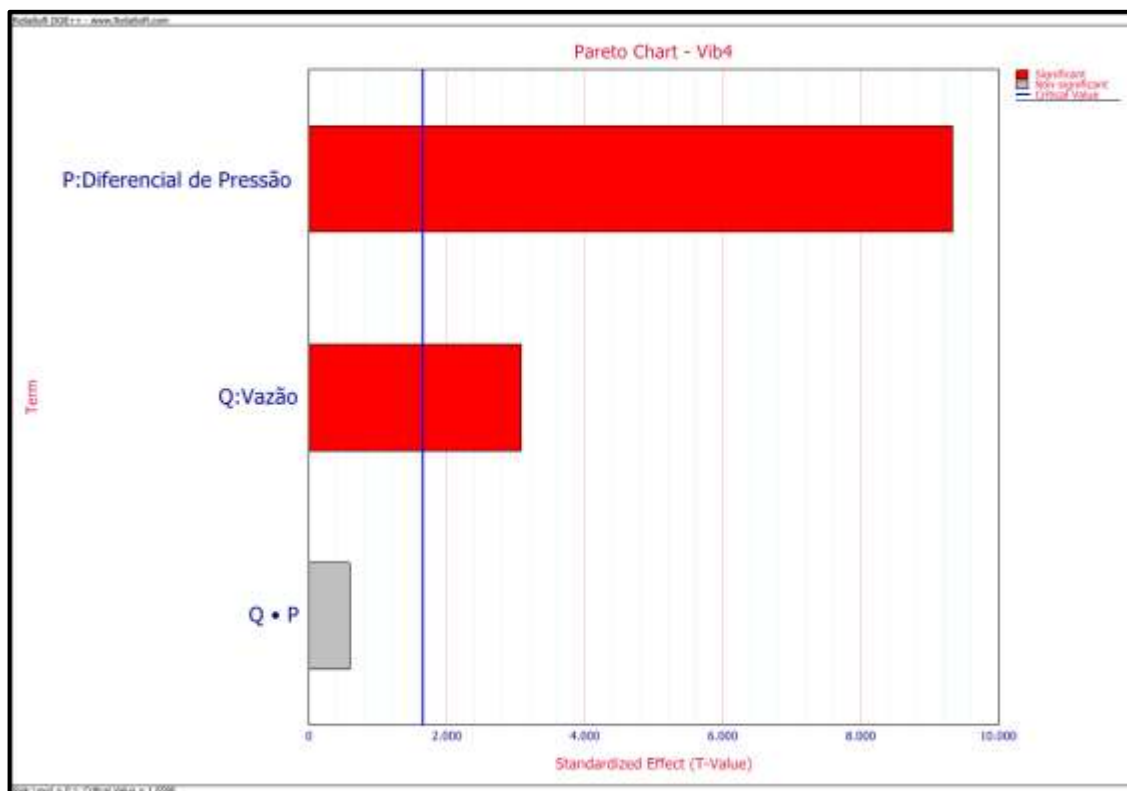


Figura 16 - Pareto Vib4 no DOE++
Fonte: Autoria própria.

Semelhante ao ponto Vib3, Vib4 também é influenciado pelo diferencial de pressão (P) e vazão (Q), não sendo significativa a interação entre os fatores.

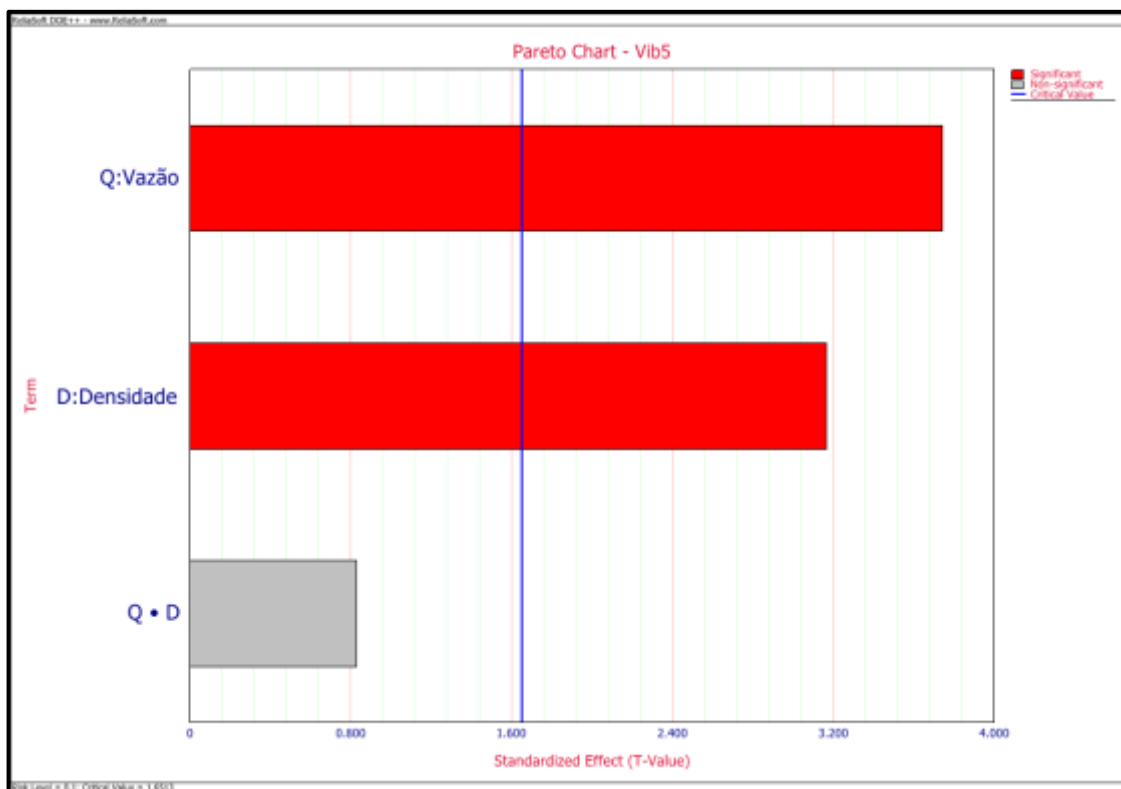


Figura 17 - Pareto Vib5 no DOE++
Fonte: Autoria própria.

Já no motor, o gráfico de Pareto mostra que o ponto Vib5 é influenciado pela vazão (Q) e densidade (D), não sendo significativa a interação entre os fatores (Q * D).

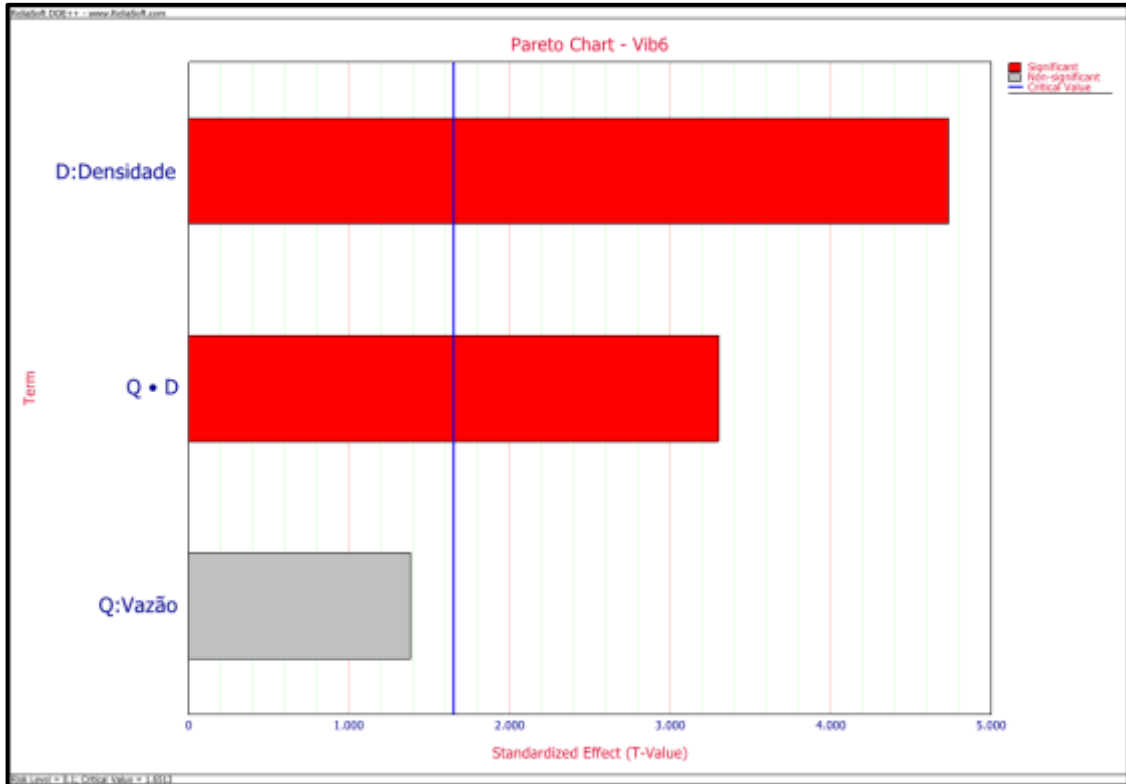


Figura 18 - Pareto Vib6 no DOE++
Fonte: Autoria própria.

Curiosamente, para o ponto Vib6 a vazão (Q) não foi tão significativa e apareceu interação entre os fatores (Q*D).

A seguir são apresentadas as equações para cada ponto que foram geradas a partir deste delineamento.

$$Vib3 = -87,5738 + 0,0592 * Q + 6,7682 * P - 0,0035 * Q * P$$

$$Vib4 = -43,8469 + 0,0592 * Q + 4,9959 * P - 0,0033 * Q * P$$

$$Vib5 = 103,8709 - 0,0255 * Q - 74,33 * D - 0,0307 * Q * D$$

$$Vib6 = -406,653 + 0,1532 * Q + 623,58 * D - 0,2071 * Q * D$$

Onde:

Q = Vazão

P = Diferencial de Pressão

D = Densidade

4.2 VERIFICAÇÃO DO MODELO

Aplicou-se as equações do item anterior a nove meses de histórico existente entre setembro/2015 a maio/2016 para verificar o erro entre o valor de vibração previsto pelo modelo e o valor real medido. Apesar dos modelos para Vib3 e Vib4 apresentarem erros grandes, os modelos para Vib 5 e Vib6 apresentaram erros bem menores, sobretudo Vib5 mantendo quase sempre o erro na faixa de 5%.

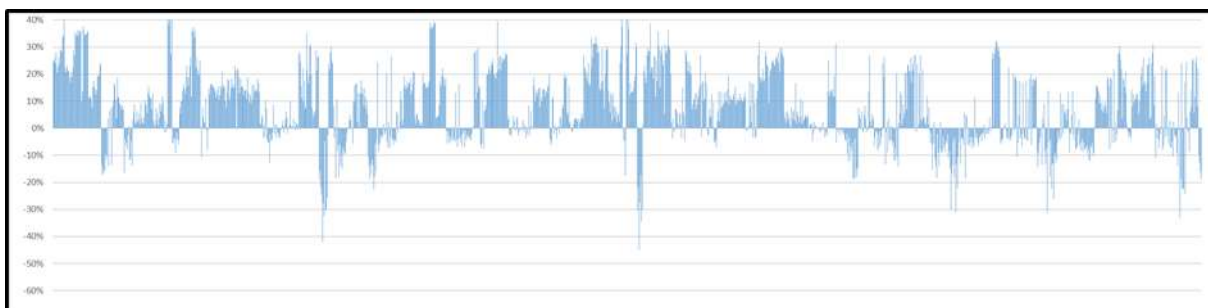


Figura 19 - Erro Vib3 Bomba A
Fonte: Autoria própria.

O erro da previsão no ponto Vib3 é alto chegando a atingir 40% de divergência quando comparado com o valor real de vibração.

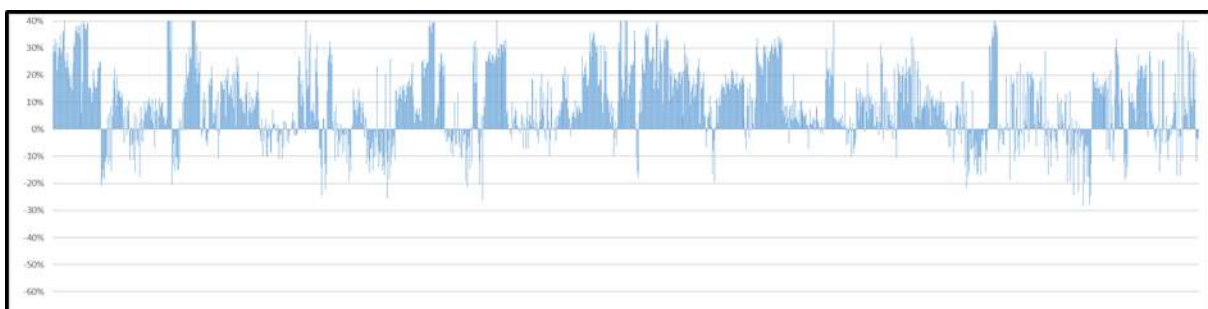


Figura 20 - Erro Vib4 Bomba A
Fonte: Autoria própria.

O erro da previsão no ponto Vib4 também é alto, semelhante ao ponto Vib3.

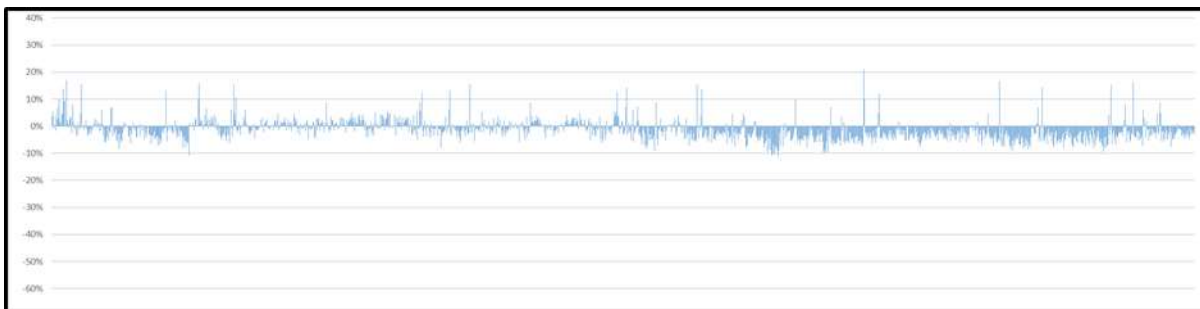


Figura 21 - Erro Vib5 Bomba A
Fonte: Autoria própria.

Os erros no motor são menores, sobretudo no ponto Vib5, permanecendo quase sempre abaixo de 5%



Figura 22 - Erro Vib6 Bomba A
Fonte: Autoria própria.

O erro no ponto Vib6 é bem menor que os pontos do motor, mas maior quando comparado com o ponto Vib5.

4.3 POSSIBILIDADE DE REDUÇÃO DO EFEITO DO RUÍDO

Observou-se que dentro do cenário estudado, a densidade do produto não é um variável que pode ser controlada, portanto, dentro da teoria de DOE deveríamos considera-la como um ruído ao invés de um fator comum. Neste caso, através de um delineamento robusto mencionado no capítulo 3, poderíamos definir o melhor ajuste da vazão de modo que a variação da vibração seja a menor possível com a variação do ruído, ou seja, ajustar a vazão para que o ruído (densidade) pouco afete o nível de vibração. No entanto, através do gráfico de interações entre vazão e densidade para Vib5 na Figura 23, é possível notar que esse ajuste não é viável, pois os objetivos são conflitantes. Ao reduzirmos a vazão, para reduzir o impacto da variação da densidade, aumentamos o nível de vibração, que é o objetivo principal.

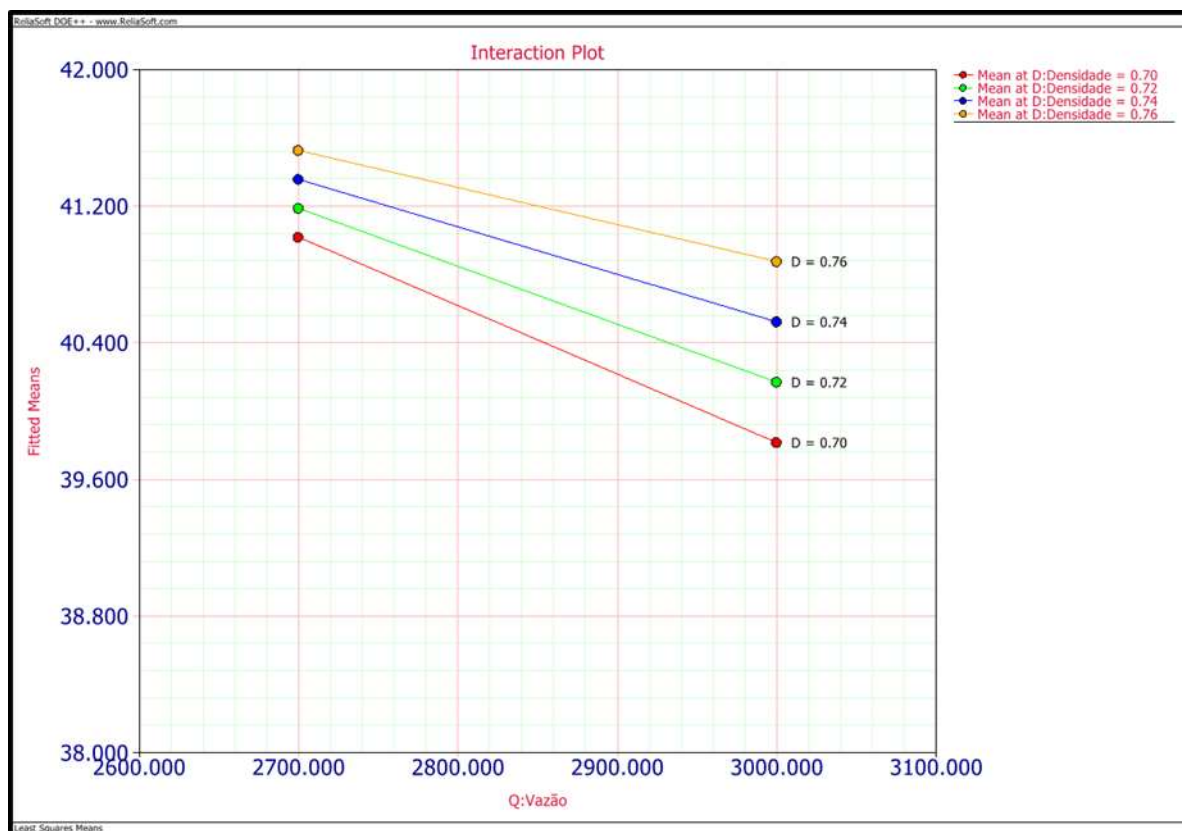


Figura 23 - Interação Densidade x Vazão no motor no DOE++
Fonte: Autoria própria.

Na vazão de 2700 m³/h a variação de vibração é menor quando comparado com a vazão de 3000 m³/h, no entanto, os níveis de vibração são maiores, chegando próximo a 42 micra para uma densidade de 0,76 g/cm³.

4.4 IMPLEMENTAÇÃO NO SISTEMA SUPERVISÓRIO

Após a validação do modelo para o ponto de vibração Vib5 no motor, foi implementado como teste uma variável com essa equação no sistema supervisório da estação. Conforme mostra a Figura 24, está sendo exibido um valor de previsão do nível de vibração ao lado do valor real.

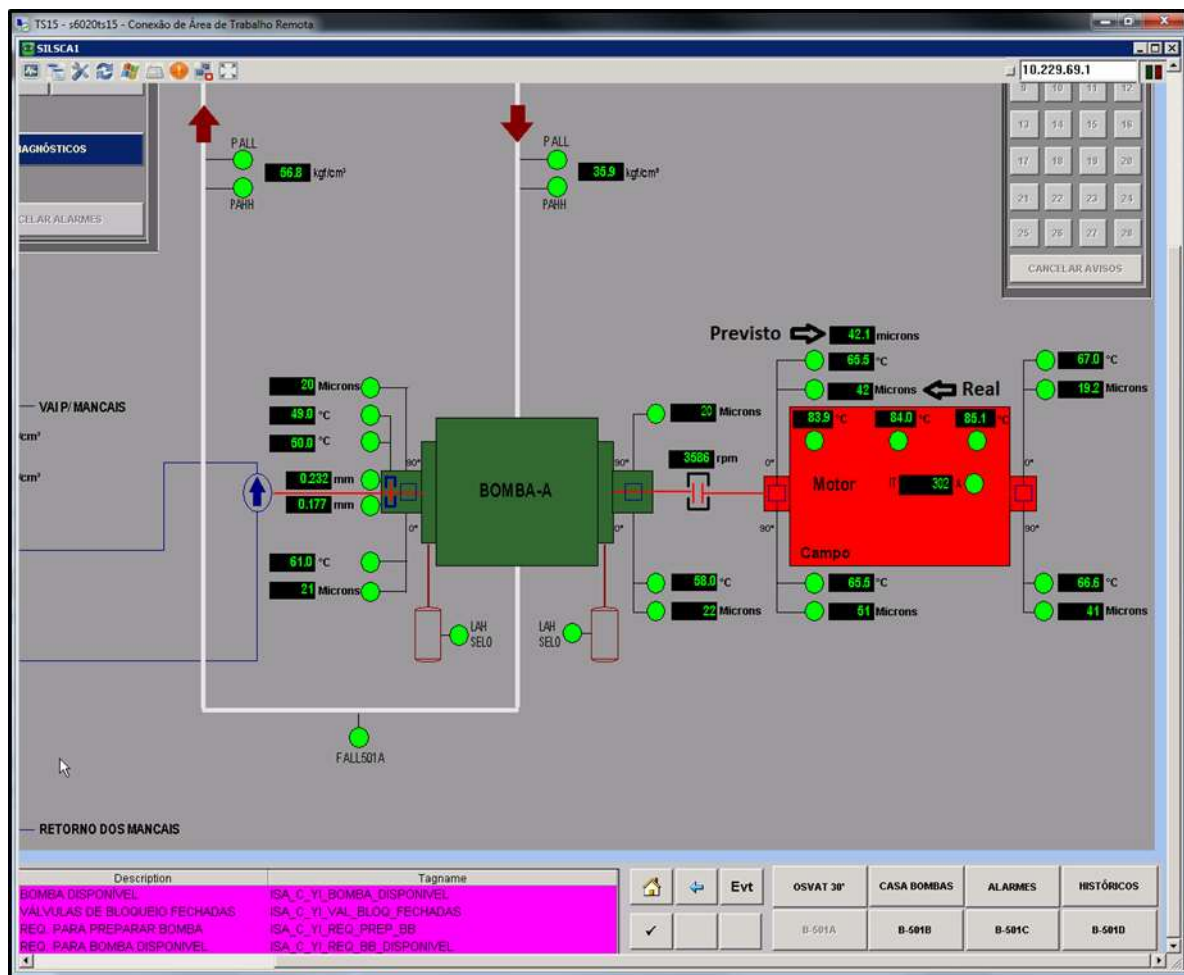


Figura 24 - Cálculo da vibração prevista no sistema supervisório
Fonte: Autoria própria.

Este dado está sendo acompanhado quase que diariamente, além de estar sendo registrado em histórico. Por meio deste registro já está sendo possível fazer a comparação do modelo através do próprio sistema supervisório conforme ilustra a Figura 25, que mostra uma partida da bomba ocorrida em 29/08/16 a partir das 3:40.

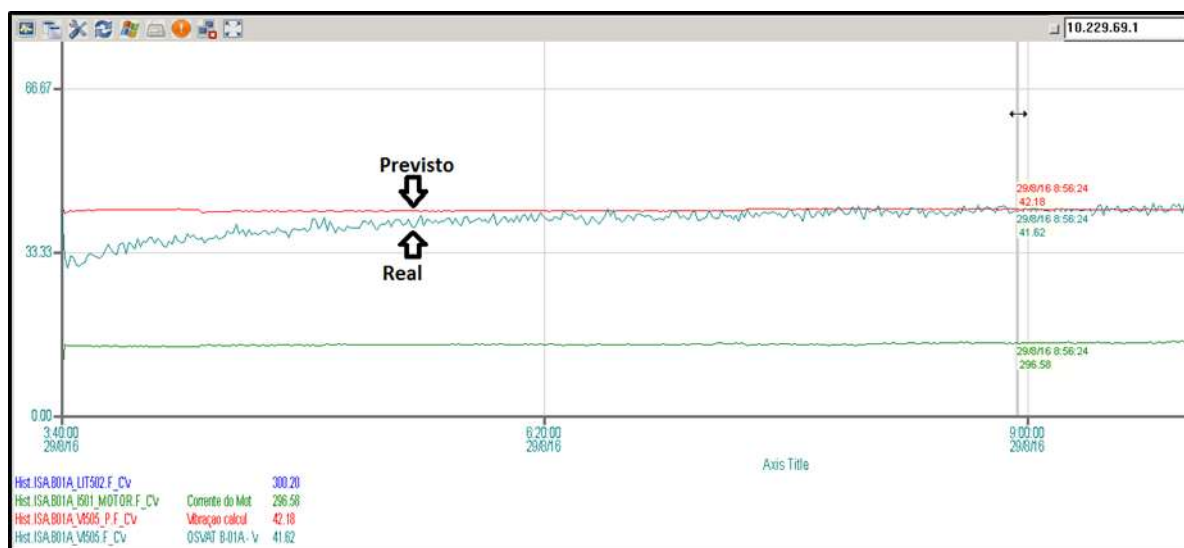


Figura 25 - Histórico da vibração prevista no sistema supervisório
Fonte: Autoria própria.

É possível notar que após a partida, o motor leva algumas horas para estabilizar o nível de vibração próximo ao previsto.

Uma premissa seguida durante a implantação deste modelo no sistema supervisório é que se a bomba está parada o valor previsto de vibração deve ser zero. Isso deve ser considerado, pois o modelo só é válido perto da região de operação que foi feito o delineamento, a região mais comum de regime permanente. Caso contrário, quando a bomba estivesse parada, apareceria um valor absurdo de previsão na tela.

4.5 ANÁLISE GERAL DOS RESULTADOS

Através dos gráficos de interações, pode-se tirar algumas conclusões.

No caso do motor, quanto maior for a densidade do produto, maior a necessidade de bombeá-lo numa vazão mais alta a fim de se reduzir o nível de vibração do motor. Isso pode ser visualizado no gráfico de interação entre vazão e densidade da **Erro! Fonte de referência não encontrada.**

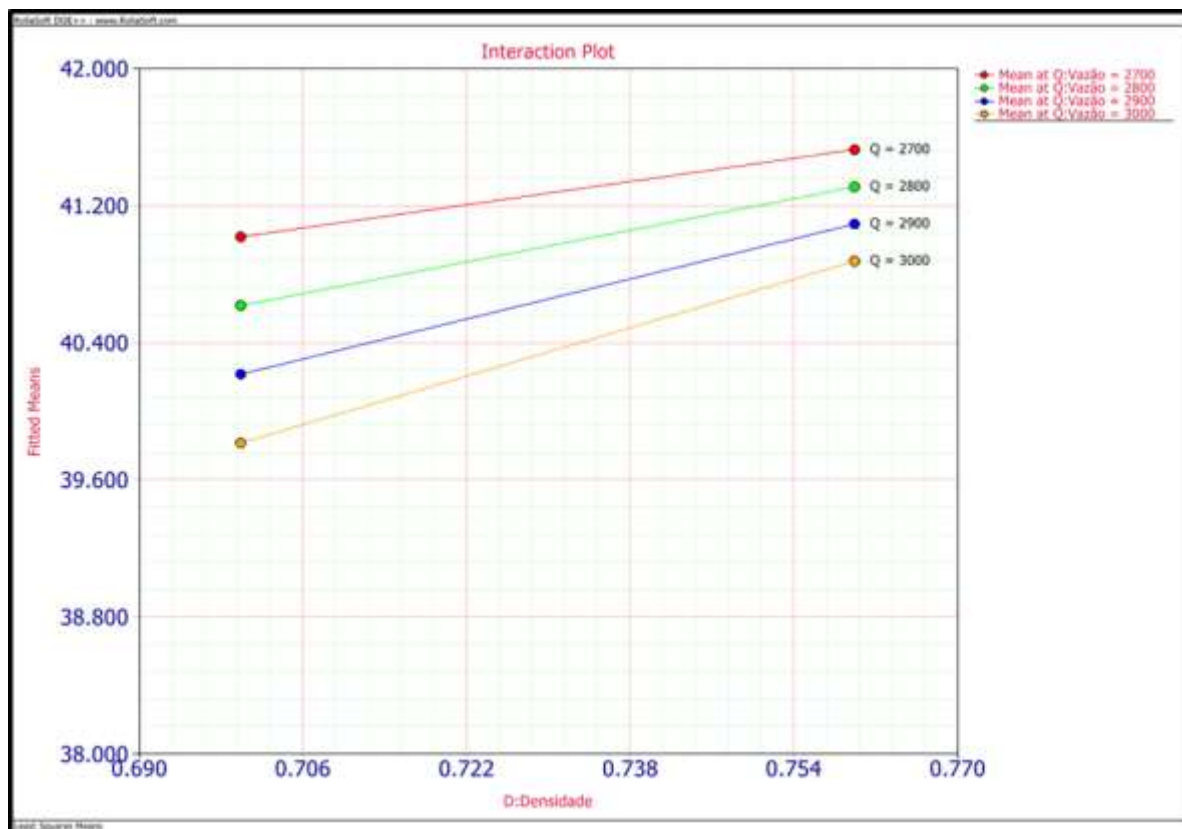


Figura 26 - Interação Vazão x Densidade no motor no DOE++
Fonte: Autoria própria.

Já no caso da bomba, através do gráfico de interação da **Erro! Fonte de referência não encontrada.**, para uma mesma vazão, o diferencial de pressão mais alto contribui para um nível de vibração mais baixo, e essa redução aumenta quanto maior a vazão. Ou seja, para vazões mais altas, o operador pode ajustar um diferencial de pressão mais alto na bomba (dentro dos limites estudados) a fim de reduzir o nível de vibração.

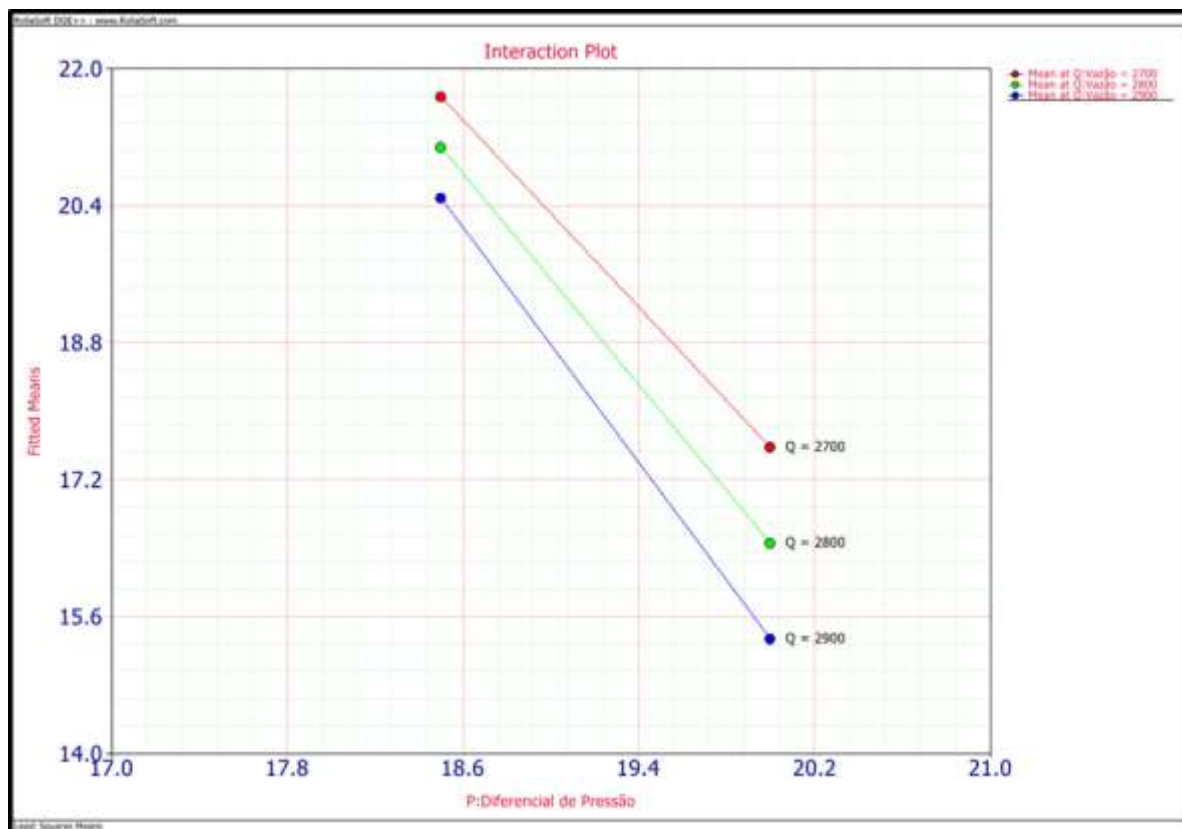


Figura 27 - Interação Vazão x Diferencial de pressão na bomba no DOE++
Fonte: Autoria própria.

Além das conclusões através dos gráficos de interações, um legado deste trabalho é a variável de predição implantada no sistema supervisor. O registro dará ao operador ao menos duas informações interessantes. A primeira é verificar em tempo real se o nível de vibração está dentro do esperado para aquela vazão e para a densidade do produto que está sendo bombeado. A Figura 28 x mostra este acompanhamento. É um exemplo de uma partida da bomba A no dia 29/08/16 que após as primeiras horas de operação estabiliza o nível de vibração para o previsto.

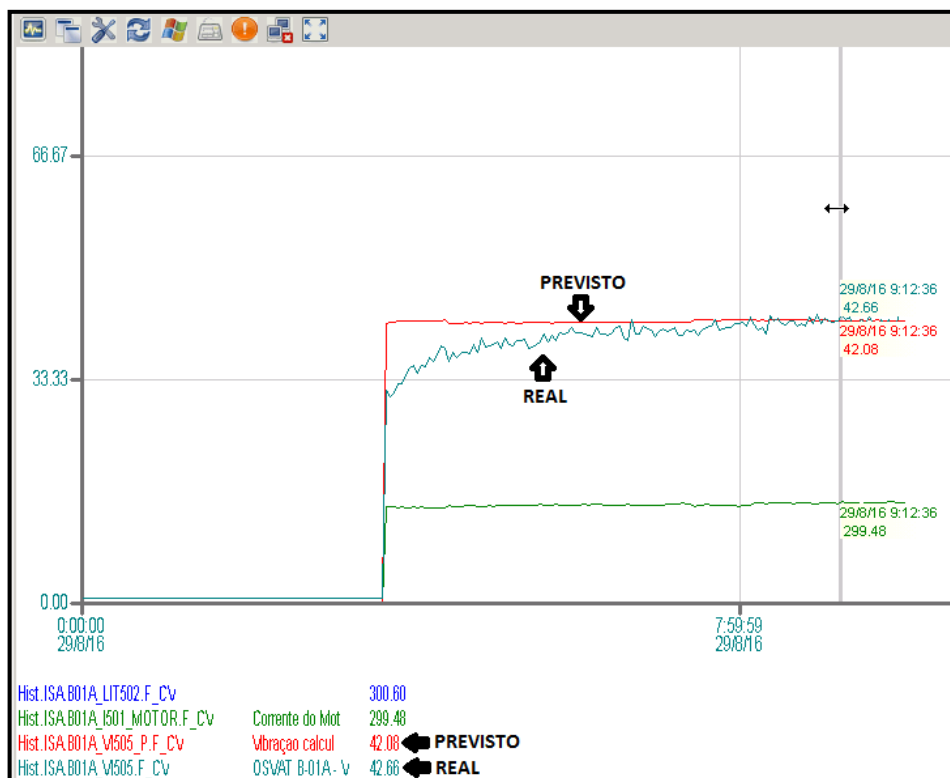


Figura 28 - Comparação do nível de vibração previsto e real através do sistema supervisório
Fonte: Autoria própria.

Caso o nível de vibração real fosse muito mais alto que o previsto existe uma possibilidade de falha real e deve ser feita uma análise de vibração aprofundada em diferentes frequências e pontos do equipamento. Como a instalação é nova, ainda não se tem dados em situações de falhas reais, porém o esperado é que no futuro, pelo desgaste natural dos componentes de um equipamento dinâmico, os níveis de vibração tendam a aumentar, descolando-se deste modelo que foi feito ainda com o equipamento novo.

A segunda informação de interesse ao operador é se as variáveis de processo, vazão e densidade, por si só já estão provocando um nível alto de vibração, ou seja, o operador pode verificar se a vazão de operação que ele ajustou está prejudicando a máquina e corrigi-la.

5 CONCLUSÃO

Por meio do delineamento de experimentos foi possível quantificar o impacto das variáveis de processo na vibração do conjunto motobomba.

Para o motor, quanto maior for a densidade do produto, maior a necessidade de bombeá-lo numa vazão mais alta a fim de se reduzir seu nível de vibração. Já na bomba, o diferencial de pressão mais alto contribui para um nível de vibração mais baixo, e essa redução da vibração aumenta quanto maior for a vazão.

Para cada um dos quatro pontos monitorados nos lados acoplados de bomba e motor encontrou-se um modelo matemático significativo para prever os níveis de vibração dentro dos limites estudados.

O modelo de um desses pontos, um dos pontos localizados no lado acoplado do motor, foi implantado no sistema supervisorio para realizar a predição do valor de vibração nesse ponto e compará-lo com o valor real. Desse modo é possível verificar se as condições operacionais de densidade e vazão que estão sendo propostas levarão o equipamento a vibrar em níveis prejudiciais. Também será possível verificar se existe uma falha real do equipamento quando o nível de vibração real estiver muito acima do previsto para aquelas condições operacionais.

Futuramente a ideia é realizar o mesmo delineamento em outros conjuntos motobombas e continuar a monitoração deste conjunto aguardando futuras falhas que possam ser detectadas com o auxílio deste modelo

6 REFERÊNCIAS

ANTONY, J. **Design of Experiments for Engineers and Scientists**. Elsevier Science & Technology Books, 2003.

RELIASOFT CORPORATION. **Experiment Design & Analysis Reference**. Tucson.2015.

MONTGOMERY, D.C. **Design and Analysis of Experiments – Eighth edition**. John Wiley & Sons Inc., 2013.

GULATI, R. **Maintenance and Reliability Best Practices**. Industrial Press Inc., New York,2009.

KENNEDY, J. L. **Oil and Gas Pipeline Fundamentals**. PennWell Publishing Company , Tulsa, 1993.

AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE – API. **API 610: Centrifugal Pumps for Petroleum, Petrochemical and Natural Gas Industries**. Washington, 2011.

EISENMANN, R.C. **Machinery Malfunction Diagnosis and Correction: Vibration Analysis and Troubleshooting for the Process Industries**. Hewlett-Packard, 2005.

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ. Sistema de Bibliotecas. Normas para elaboração de trabalhos acadêmicos. Curitiba: UTFPR, 2009. Disponível em: <http://www.utfpr.edu.br/documentos/normas_trabalhos_utfpr.pdf>. Acesso em: 11 nov. 2011.