

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE MECÂNICA
ENGENHARIA MECÂNICA**

VITOR HUGO TOSETTO NAVARRO SALES

**ANÁLISE DOS CAMINHOS DE TRANSFERÊNCIA DE ENERGIA DO
SISTEMA DE ACOPLAMENTO DE UMA BOMBA HIDRÁULICA**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

PONTA GROSSA

2019

VITOR HUGO TOSETTO NAVARRO SALES

**ANÁLISE DOS CAMINHOS DE TRANSFERÊNCIA DE ENERGIA DO
SISTEMA DE ACOPLAMENTO DE UMA BOMBA HIDRÁULICA**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentada como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica, do Departamento Acadêmico de Engenharia Mecânica, da Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

Orientador: Prof. Dr. Mário José Van Thienen da Silva

PONTA GROSSA

2019



TERMO DE APROVAÇÃO

ANÁLISE DOS CAMINHOS DE TRANSFERÊNCIA DE ENERGIA DO SISTEMA DE ACOPLAMENTO DE UMA BOMBA HIDRÁULICA

por

VITOR HUGO TOSETTO NAVARRO SALES

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi apresentado em 25 de novembro de 2019 como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica. O candidato foi arguido pela Banca Examinadora composta pelos professores abaixo assinados. Após deliberação, a Banca Examinadora considerou o trabalho aprovado.

Prof. Dr.Mário José Van Thienen da Silva
Orientador

Prof. Dr.Luis Gustavo Vieira Gonçalves
Membro Titular

Prof. Me.Ruimar Rubens de Gouveia
Membro Titular

Prof.Dr. Marcos Eduardo Soares
Responsável pelos TCC

**Prof. Dr. Marcelo Vasconcelos de
Carvalho**
Coordenador do Curso

RESUMO

SALES, Vitor H. T. N. **Análise dos Caminhos de Transferência de Energia do Sistema de Acoplamento de Uma Bomba Hidráulica.** 2019. 35 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Mecânica) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Ponta Grossa, 2019.

O ruído gerado por um produto pode estar ligado a diversas de suas fontes de excitação quando em funcionamento. Ainda assim, os sistemas que o compõe podem possuir ou não componentes que contribuam para a oscilação do conjunto. Visando entender como essas fontes se comportam, o trabalho consiste na aplicação de uma Transfer Path Analysis no sistema de acoplamento de uma bomba hidráulica utilizada em um purificador de água. A análise tem como objetivo principal identificar o componente crítico dentre os conectores hidráulicos e suportes plástico e de metal contribuinte para o alto nível de ruído do sistema.

Palavras-chave: Vibrações Mecânicas. Ruído. Transfer Path Analysis.

ABSTRACT

SALES, Vitor H. T. N. **Transfer Path Analysis of a Hydraulic Pump's Attachment System**. 2019. 35 p. Final Coursework (Bachelor's Degree in Mechanical Engineering) – Federal University of Technology - Paraná. Ponta Grossa, 2019.

Noise generated by a product can be related to several of its excitation sources when functioning. Even though, the systems that compose it may or may not have components contributing to the overall oscillation of the set. In order to understand how these sources behave, the coursework consists of applying a Transfer Path Analysis to the attachment system of a hydraulic pump used in a water purifier. The main objective of the analysis is to identify the critical component among the hydraulic connectors and plastic and metal supports that contribute to the high noise level of the system.

Keywords: Mechanical Vibrations. Noise. Transfer Path Analysis.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a todos os que por algum motivo contribuíram para a realização deste trabalho. Em especial, agradeço aos meus pais por todo o suporte durante esta caminhada, ao meu orientador, professor Mário, por sua paciência e compreensão e por fim, à Anna Vitória, por toda a sua compreensão e motivação.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Sistemas com variados graus de liberdade.....	10
Figura 2 – Representação de modelos de sistemas	11
Figura 3 – Representação das fontes de ruído de uma bomba	12
Figura 4 – Variação da amplitude de vibração em função da razão entre frequências	14
Figura 5 – Representação da oscilação de um sistema.....	15
Figura 6 – Representação de um sistema com dois graus de liberdade.....	16
Figura 7 – Ilustração da aplicação de uma TPA no sistema	16
Figura 8 – Bancada de testes.....	18
Figura 9 – Componentes do sistema.....	19
Figura 10 – Primeira condição de acoplamento	20
Figura 11 – Primeira condição de acoplamento	20
Figura 12 – Posicionamento dos acelerômetros na primeira condição	21
Figura 13 – Suporte de plástico.....	22
Figura 14 – Posição dos acelerômetros na segunda condição	23
Figura 15 – Terceira condição de acoplamento	24
Figura 16 – Posição dos acelerômetros na terceira condição	24
Figura 17 – Resultados para a primeira condição	26
Figura 18 – Resultados para a segunda condição	27
Figura 19 – Resultados para a terceira condição	29
Figura 20 – Proposta de solução.....	30
Figura 21 – Resultados para a proposta de solução	31

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	7
2 OBJETIVOS	8
2.1 OBJETIVO GERAL	8
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	8
3 VIBRAÇÕES MECÂNICAS	9
3.1 VIBRAÇÕES EM BOMBAS HIDRÁULICAS	11
4 TRANSMISSIBILIDADE	13
4.1 TRANSFER PATH ANALYSIS	15
5 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL	18
5.1 PRIMEIRA CONDIÇÃO DE ACOPLAMENTO	19
5.2 SEGUNDA CONDIÇÃO DE ACOPLAMENTO	22
5.3 TERCEIRA CONDIÇÃO DE ACOPLAMENTO	23
6 RESULTADOS E DISCUSSÃO	26
6.1 PRIMEIRA CONDIÇÃO DE ACOPLAMENTO	26
6.2 SEGUNDA CONDIÇÃO DE ACOPLAMENTO	27
6.3 TERCEIRA CONDIÇÃO DE ACOPLAMENTO	28
6.4 PROPOSTA DE SOLUÇÃO	30
7 CONCLUSÃO	32
REFERÊNCIAS	33

1 INTRODUÇÃO

A emissão de ruído por produtos eletrodomésticos pode gerar incômodo aos seus usuários. Assim, estratégias de mitigação ou redução são constantemente adotadas por empresas deste segmento a fim de garantir produtos silenciosos.

Os purificadores de água e máquinas de bebidas não são exceções. Presentes em aproximadamente 50% das residências brasileiras segundo IBGE (2015), estes produtos podem apresentar componentes críticos para a emissão de ruídos indesejáveis.

Um destes componentes é a bomba hidráulica, que segundo Rocha (2012), durante o seu processo de operação natural tende a interagir com outros componentes gerando vibração estrutural e dissipação de barulho.

Diante deste cenário, a investigação dos caminhos de interação se faz necessária. Entender quais são os componentes associados à fonte de vibração que potencializam a excitação é crucial para que as soluções sejam assertivas na redução do nível de ruído do produto. Esta investigação pode se dar de diversas maneiras, e uma delas é a TPA (Transfer Path Analysis ou Análise dos caminhos de transferência de energia em português), que é classificada por Plunt (2005) como uma técnica estabelecida para mensurar e classificar a contribuição de cada componente para a vibração do sistema.

Conforme o que foi apresentado, o presente trabalho consiste no estudo de caso da aplicação de uma TPA no sistema de acoplamento de uma bomba hidráulica utilizada em purificador de água. Seu problema de pesquisa é o alto nível de ruído do componente, que apresenta índices consideráveis de reclamação de consumidor. Assim, o trabalho busca entender quais são os componentes críticos do sistema para facilitar a aplicação de uma solução barata que não altere o projeto interno da bomba, manufaturada por fornecedor estrangeiro.

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

Identificar o componente vibratório crítico do sistema de acoplamento da bomba hidráulica a fim de gerar soluções viáveis para a redução de ruído do produto.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Classificar e analisar a contribuição de cada um dos componentes do sistema;
- Mensurar o nível de vibração do conjunto;
- Identificar oportunidades de solução.

3 VIBRAÇÕES MECÂNICAS

Todo corpo dotado de massa e elasticidade está sujeito a vibrações. Instrumentos antigos como tambores e apitos são provas de que o fenômeno da geração de ondas sonoras a partir de movimentos vibratórios é conhecido pela humanidade há tempos, ainda que de forma empírica (SOEIRO, 2008).

Estudiosos do passado, como Aristófanos e Heródoto direcionaram pesquisas a este tópico, investigando o movimento de pêndulos ou até transdutores de vibrações, mas segundo Soeiro (2008), foi Galileu quem observou e começou a entender o conceito de frequência natural, a partir da relação entre o comprimento do pêndulo e o seu período de oscilação.

Hoje, instrumentos de alta tecnologia são capazes de medir vibrações em vários tipos de sistemas, com números variados de graus de liberdade já que o conceito de vibrações mecânicas é difundido e profundamente estudado mundo a fora.

O conceito de vibrações se baseia no movimento de um corpo ou sistema estrutural ao redor de uma determinada posição de equilíbrio. Este fenômeno se inicia a partir da aplicação de uma energia no corpo inercial que o faz oscilar em torno de sua posição inicial. No caso da não existência de forças não conservativas, o sistema tende a oscilar eternamente, mas quando elas atuam, ele ao longo do tempo volta a sua posição inicial de equilíbrio (Kelly, 2011).

Estes movimentos ocorrem normalmente em máquinas e estruturas, e podem ser classificados segundo Soeiro (2008) da seguinte forma:

Quanto à existência ou não de excitação:

- Vibrações livres: causadas por condições iniciais de movimento;
- Vibrações Forçadas: causadas por uma força ou torque externos aplicados ao sistema. Uma vez cessada a aplicação dessas formas, o sistema volta ao regime de vibrações livres.

Quanto a existência ou não de amortecimento:

- Vibrações não amortecidas: quando não há perda de energia;
- Vibrações amortecidas: a energia é perdida através do atrito.

Quanto à linearidade:

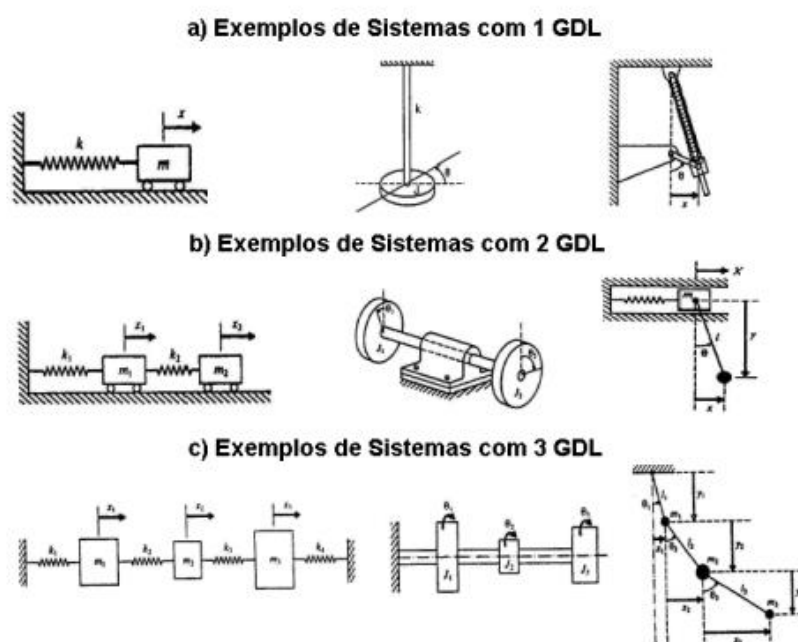
- Vibrações lineares: existe proporcionalidade entre a excitação e a resposta do sistema;
- Vibrações não-lineares: não existe proporcionalidade entre excitação e resposta do sistema.

Quanto à previsibilidade da ocorrência:

- Vibrações determinísticas: a excitação é conhecida para qualquer tempo dado;
- Vibrações aleatórias: a magnitude da excitação não pode ser determinada para dado tempo.

Além disso, para qualquer sistema passível de oscilações, é necessário entender qual é o número de Graus de Liberdade, ou seja, o número mínimo de coordenadas que descrevem completamente o movimento do sistema. A figura 1 apresenta alguns exemplos de sistemas com 1, 2 e 3 graus de liberdade (Soeiro, 2008).

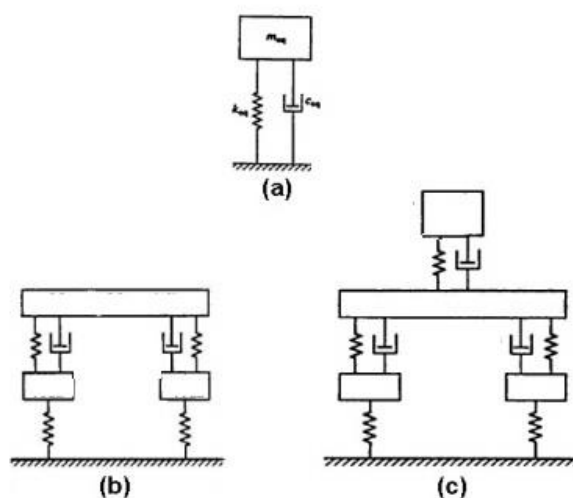
Figura 1 – Sistemas com variados graus de liberdade



Fonte: Soeiro (2008)

A modelagem de um sistema vibratório deve assumir algumas premissas, que segundo Kelly (2011), são implícitas, como determinar a rigidez, inércia e quantificar a perda de energia. Apesar disso, um sistema pode ser modelado de diversas maneiras, desde que busque apresentar coerência com seu verdadeiro comportamento. A figura 2 apresenta algumas formas de se modelar o sistema estudado neste trabalho.

Figura 2 – Representação de modelos de sistemas



Fonte: Adaptado de Soeiro (2008)

Todos os componentes do sistema que absorvam alguma energia dissipada pelo elemento de oscilação podem ser considerados molas durante a modelagem, e assim atuam de acordo com a sua rigidez. Para simplificação de sistemas complexos, o cálculo da rigidez equivalente a todas as molas permite a premissa de que apenas uma é atuante.

Os elementos que dissipem energia no sistema são considerados amortecedores, e podem ser classificados de acordo com o tipo de amortecimento, sendo eles viscoso, seco ou estrutural.

3.1 VIBRAÇÕES EM BOMBAS HIDRÁULICAS

Em bombas, o ruído gerado pelo motor associado é normalmente muito maior quando comparado aos outros componentes (Environmental Protection Department,

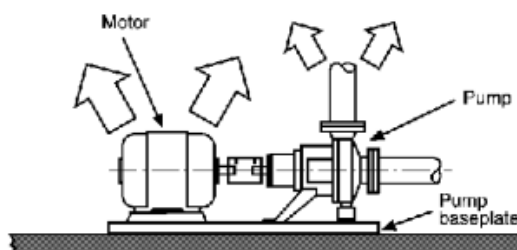
2005). Ainda assim, fontes comuns de ruído em bombas são a variação de pressão gerada no fluido, a vibração das paredes e superfícies do componente, rotores desbalanceados e até má instalação. Segundo Birajdar, Patil & Khanzode (2009), as fontes de vibração em bombas podem ser segmentadas em três categorias, sendo elas:

1. Mecânicas: Desbalanceamento de elementos rotativos, rotor danificado, tensão nos tubos associados, componentes mal fixados, acoplamento mal projetado, desalinhamento entre bomba e motor.
2. Hidráulicas: Bomba operando fora do ponto de melhor eficiência, recirculação interna, fluxo não laminar.
3. Periféricas: vibração harmônica de equipamentos posicionados perto da bomba, bomba operando em velocidade crítica.

O fluxo dentro de uma bomba é tri-dimensional, muito turbulento e não estacionário, o que resulta em pulsações de pressão e conseqüentemente ruídos gerados por essa instabilidade. Essas oscilações se propagam por tubos conectados e também através da vibração de componentes que tem interface externa, se propagam para elementos vizinhos (Dürer & Wurm, 2006).

As pulsações de pressão podem ser detectadas em diferentes frequências, normalmente múltiplas das frequências de rotação, segundo Dürer & Wurm (2006), e por isso variam de acordo com alguns parâmetros de rotação.

Figura 3 – Representação das fontes de ruído de uma bomba



Fonte: Environmental Protection Department (2005)

4 TRANSMISSIBILIDADE

A transmissibilidade de excitação pode ser considerada “a fração da amplitude da força de excitação que é transmitida através do sistema” (Blake, 2010). Assim, todo sistema sujeito a oscilações mecânicas pode apresentar transmissão de excitação, mesmo que este possua amortecedores que reduzam essa parcela.

Um sistema com um grau de liberdade, massa-mola-amortecedor pode ser descrito pela equação 1 (da Silva, 2009):

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = F\text{sen}(\omega t)$$

Onde $F\text{sen}(\omega t)$ representa a amplitude de excitação aplicada ao sistema e $m\ddot{x}$, $c\dot{x}$ e kx representam respectivamente a parcela de massa, amortecimento e rigidez.

Se tratando esta de uma equação diferencial linear e não-homogênea, a sua solução se da (depois de algumas considerações) pela equação 2 (da Silva, 2009):

$$x(t) = X_h e^{-\xi\omega_n t} \text{sen}(\omega_d t + \phi) + \frac{F/k}{\sqrt{(1-r^2)^2 + (2\xi r)^2}} \text{sen}(\omega t - \varphi),$$

Onde,

X_h representa a amplitude da resposta transitória;

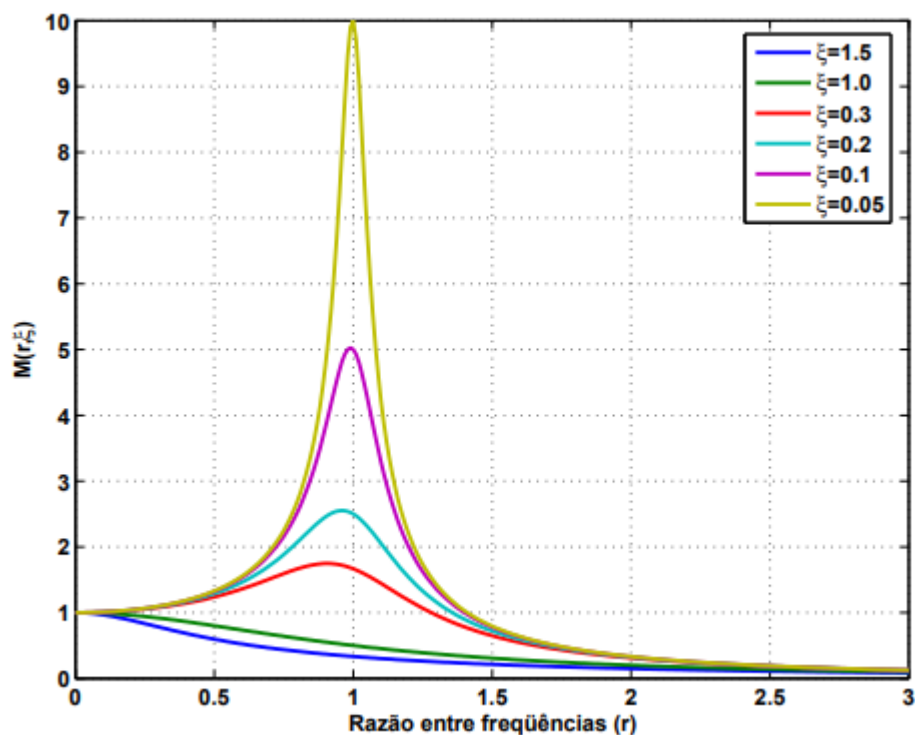
ω_n representa a frequência natural do sistema;

ξ representa o fator de amortecimento;

r representa a razão entre as frequências de excitação e natural.

Esta equação é ilustrada pela figura 4, que segundo da Silva (2009), apresenta a variação da amplitude de vibração do sistema com relação à razão entre as frequências de excitação e natural.

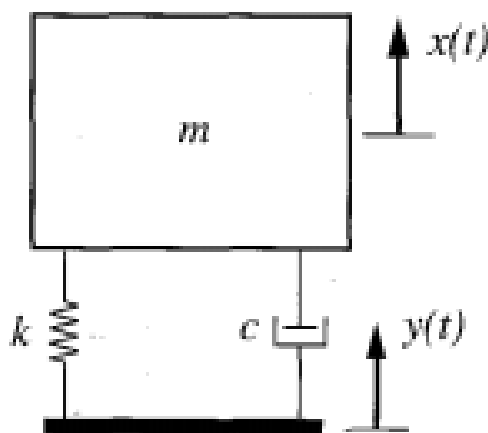
Figura 4 – Variação da amplitude de vibração em função da razão entre frequências



Fonte: da Silva (2009)

Nota-se que para uma razão entre frequências sendo 1, ou seja, para a frequência de excitação próxima a frequência natural, podem ocorrer vibrações com amplitude muito alta, o que é indesejável para um equipamento que não deve apresentar altos níveis de ruído (Mucheroni, 2001). Este efeito é atenuado conforme o fator de amortecimento aumenta, e por isso é extremamente recomendável em sistemas oscilatórios que se apliquem componentes como dampers ou gromets para a atenuação de vibrações.

Frequências de excitação com grandeza superior a duas vezes a frequência natural do sistema são extremamente indicadas para que se evite o acontecimento do fenômeno de ressonância, que gera oscilação descontrolada e instabilidade no sistema. Muitas vezes resulta em danos irreparáveis as estruturas e elementos que o compõe (da Silva, 2009).

Figura 5 – Representação da oscilação de um sistema

Fonte: Meirovitch (2001)

Na figura 5, Meirovitch (2001) ilustra o movimento oscilatório de um sistema como o da bomba estudado neste trabalho. A oscilação da base é representada pelo deslocamento $y(t)$ no qual estamos interessados, transmitido pela aplicação de uma força $F(t)$ e parcialmente amortecido pelos componentes de conexão.

4.1 TRANSFER PATH ANALYSIS

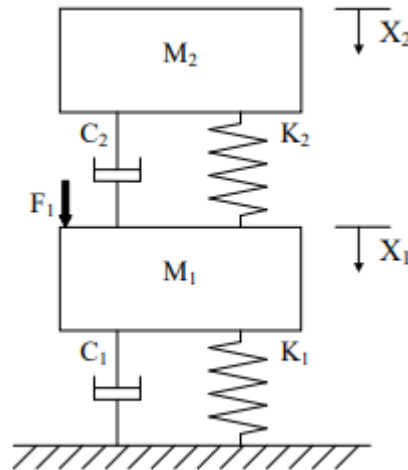
Muito utilizada na indústria automotiva, a transfer path analysis (análise dos caminhos de energia, em português) tem como grande objetivo conhecer a contribuição de cada fonte para os ruídos do sistema (Tcherniak & Schuhmacher, 2009).

Segundo Sitter, Guillaume & Devriendt (2007), ela é essencial para o entendimento do comportamento oscilatório de todos os subsistemas que compõe determinado sistema mecânico. Apesar disso, ainda possui desvantagens por não ser totalmente precisa com relação a variação entre a força efetiva de operação do sistema e as forças aplicadas.

Para Klerk & Ossipov (2010), o método consiste em medir as respostas em pré-determinados pontos, analisando os componentes de interesse, e assim poder estabelecer e identificar os caminhos de transferência. Como o método utiliza

medições operacionais, acaba se tornando uma alternativa rápida e viável para a indústria.

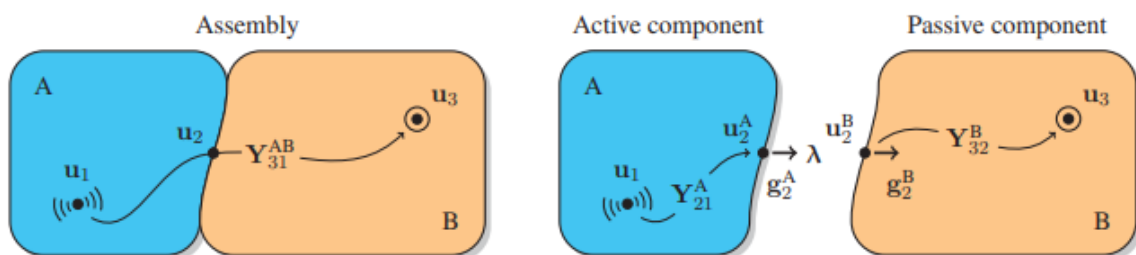
Figura 6 – Representação de um sistema com dois graus de liberdade



Fonte: Sitter, Guillaume & Devriendt (2007)

A figura 6 ilustra um sistema com dois graus de liberdade. Com a TPA, é possível saber a resposta deste montado, e em caso de necessidade de identificação dos níveis de oscilação dos subsistemas, o mesmo deve ser desmontado e cada componente deve passar por uma medição.

Figura 7 – Ilustração da aplicação de uma TPA no sistema



Fonte: Seijs, Pasma, de Klerk & Rixen (2014)

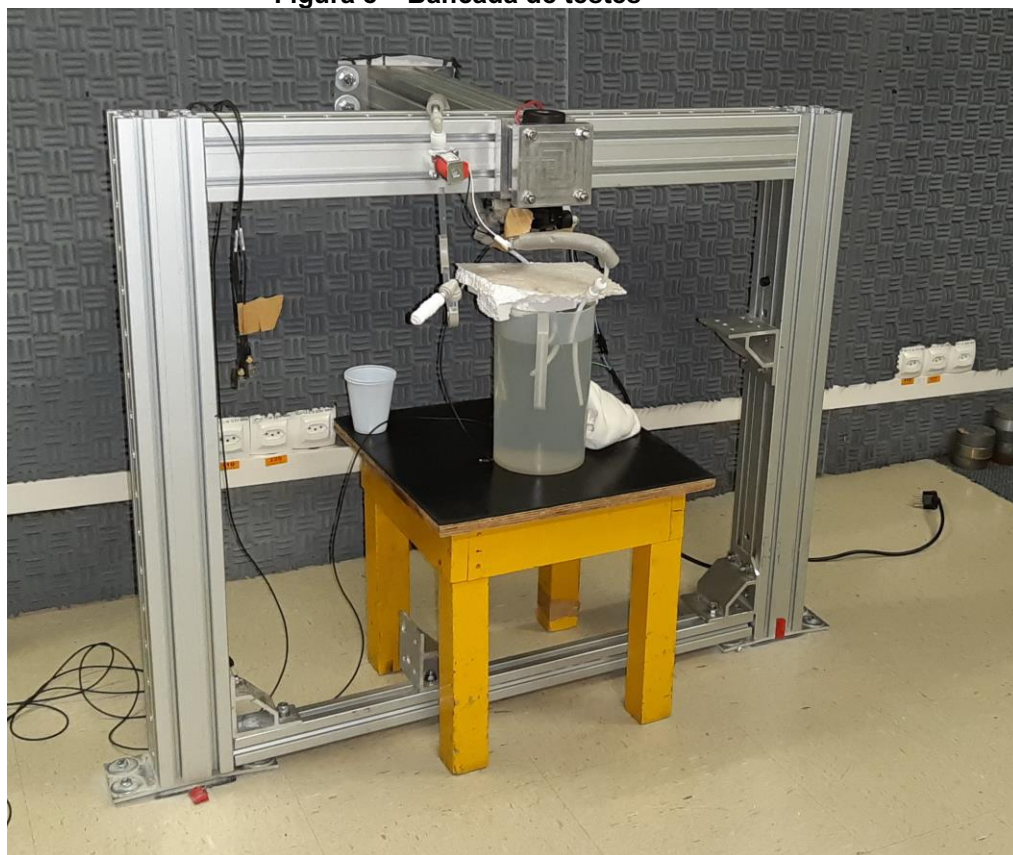
A TPA atua como na figura acima, identificando os níveis de vibrações do componente ativo, do componente passivo e de todo o sistema. Desde que o conjunto possa ser segmentado desta forma, este é passível de análise e por isso o método é tão difundido como uma ferramenta flexível dentro das empresas,

especialmente na urgência de resolver problemas que possam aparecer (Seijs, Pasma, de Klerk & Rixen, 2014).

5 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

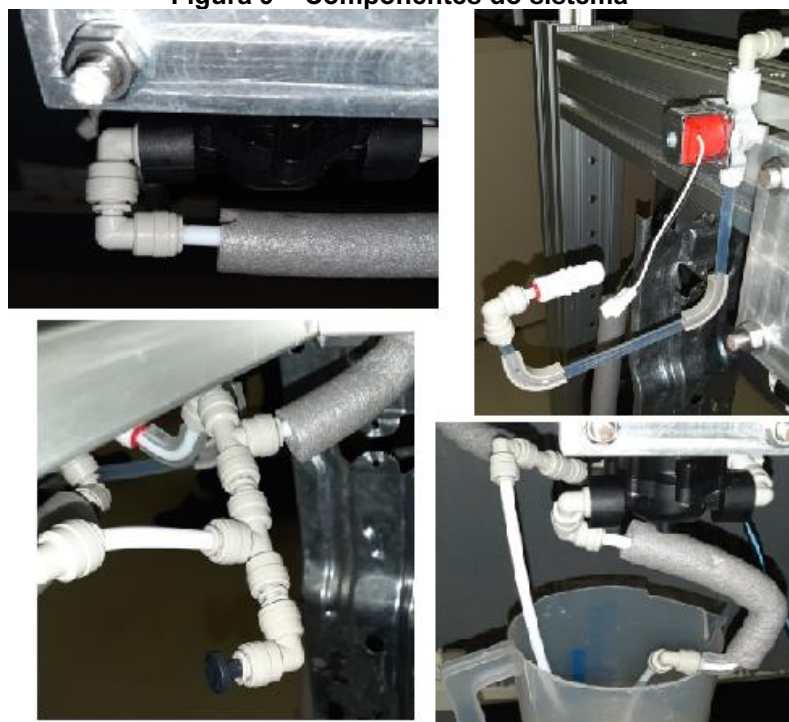
Para o desenvolvimento da análise, a bancada de testes apresentada na figura 8 foi utilizada. A mesma possui estrutura de alumínio e é fixa em uma das paredes de uma camara quieta.

Figura 8 – Bancada de testes



Fonte: Aatoria própria

O experimento teve como objetivo simular o acoplamento de um conjunto bomba mais tubos e componentes em um produto. Este, era formado por uma bomba centrífuga manufaturada por fornecedor externo, 6 conexões cotovelos de $\frac{1}{4}$ ", duas conexões t de $\frac{1}{4}$ ", tubos de $\frac{1}{4}$ ", uma válvula solenoide de uma via, tiras de gaxeta que revestiam tubos de silicone de $\frac{1}{4}$ " utilizados para transportar água quente em produto, duas check valves também de $\frac{1}{4}$ " de diâmetro e por fim um tanque adaptado para garantir a recirculação de água no sistema.

Figura 9 – Componentes do sistema

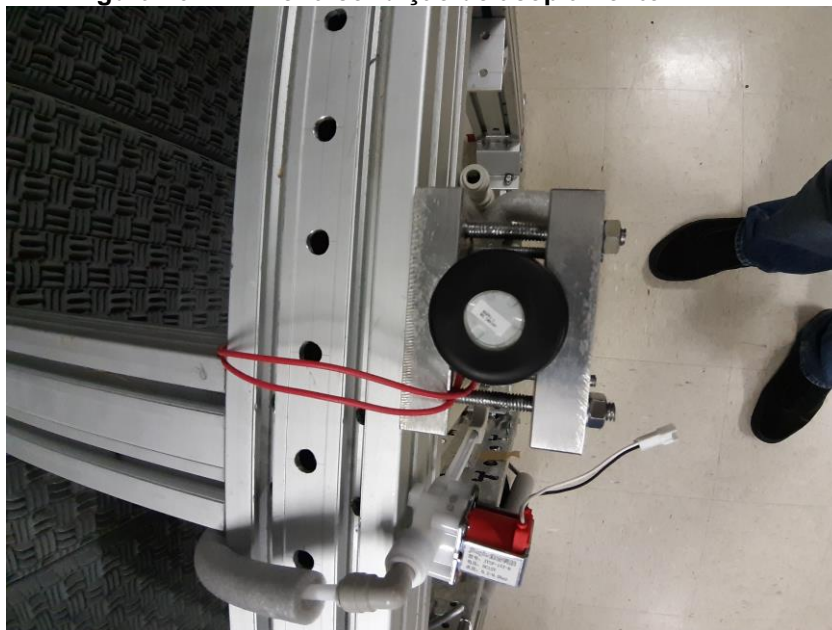
Fonte: Autoria própria

Era indispensável que o layout hidráulico do produto fosse mantido, assim como o projeto interno da bomba não poderia ser alterado. Desta forma, a TPA foi escolhida para identificar quais eram os componentes externos críticos em termos de dissipação de energia e ruído para que fossem propostas mudanças no sistema e para isso foram testadas três condições específicas de conexão.

5.1 PRIMEIRA CONDIÇÃO DE ACOPLAMENTO

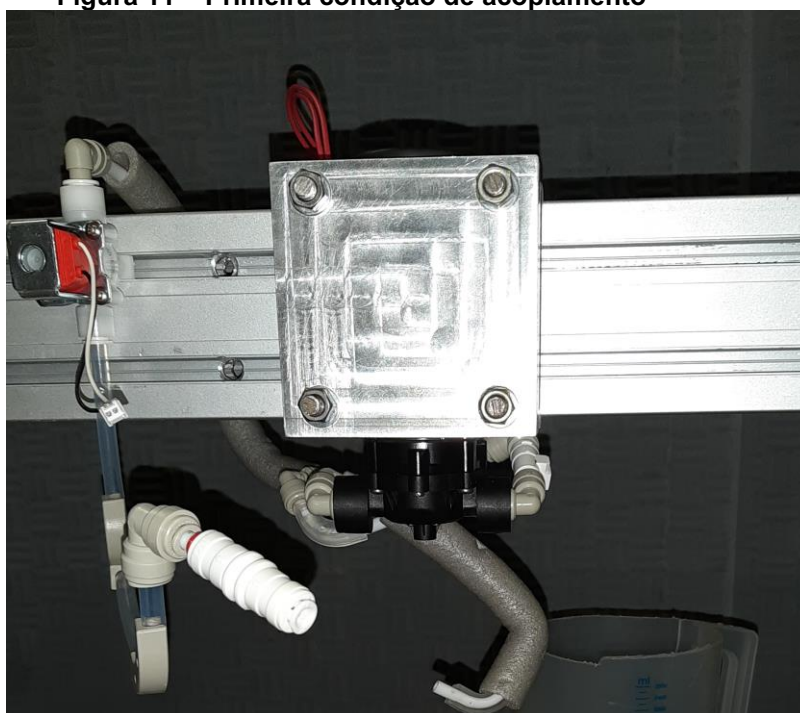
A primeira das condições consistia na fixação entre o conjunto bomba mais tubos e a estrutura utilizando placas de alumínio desenvolvidas especificamente para esta TPA. O objetivo destas placas era entender como o sistema se comportaria envolto a estruturas rígidas, e assim identificar e mensurar a quantidade de energia transferida da bomba para o sistema de tubulações. As figuras 9 e 10 ilustram o setup da primeira condição de acoplamento testada.

Figura 10 – Primeira condição de acoplamento



Fonte: A autoria própria

Figura 11 – Primeira condição de acoplamento



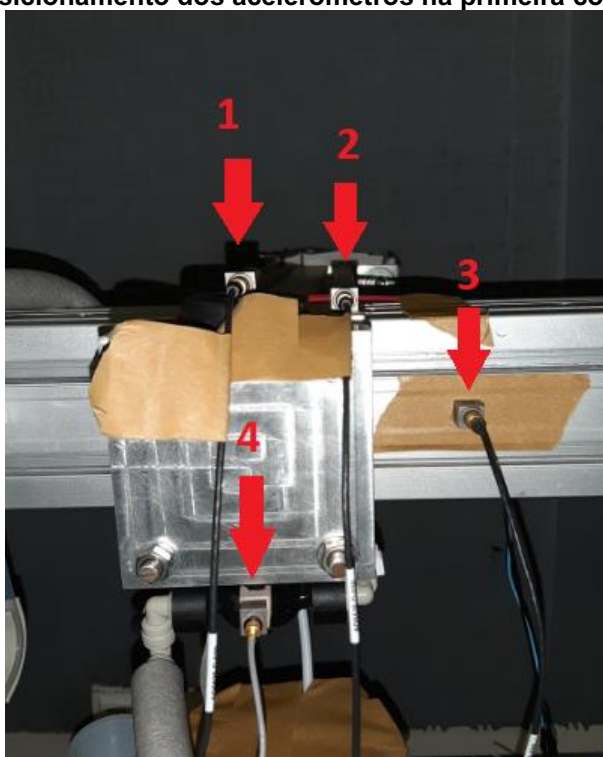
Fonte: A autoria própria

Quatro acelerômetros triaxiais do modelo 4535-B da marca *Brüel & Kjaer* foram acoplados ao sistema. Estes estavam conectados ao hardware processador

LMS Scadas da marca *Siemens*, que transferia os dados capturados a um software chamado *SIMCenter Test Lab*.

A figura 12 ilustra o posicionamento dos acelerômetros. Dois deles foram posicionados na bomba, sendo o número 1 no corpo que estava sob a atuação das placas rígidas, onde se esperava menor vibração, e o número 4 na “cabeça” da bomba, que tinha contato direto com o sistema de tubulações. Os acelerômetros 2 e 3 foram posicionados na estrutura onde o sistema foi fixado na intenção de entender a efetividade do isolamento desenvolvido para o experimento.

Figura 12 – Posicionamento dos acelerômetros na primeira condição



Fonte: Autoria própria

Resgatando o conceito apresentado na figura 7 e o relacionando com o experimento, o conjunto bomba, placas de acoplamento e tubulação representa o componente ativo do sistema enquanto a estrutura atua como o passivo.

Para as medições, a bomba foi ligada e o sistema permaneceu assim durante 2 minutos até que se encontrasse em condições estacionárias de funcionamento. Após esses dois minutos, as medições foram iniciadas e computadas por 30 segundos.

5.2 SEGUNDA CONDIÇÃO DE ACOPLAMENTO

A segunda condição de acoplamento substituiu as placas de alumínio por um suporte de plástico revestido internamente com espuma na fixação do conjunto. Para esta condição, diferentemente da primeira, era esperado que a vibração da bomba fosse transmitida de forma intensa para o suporte, que é ilustrado na figura 13.

Este modelo de acoplamento simulava parcialmente o atual design aplicado em produto e por isso foi proposto. Assim, sua intenção foi justamente entender como a energia era transmitida do conjunto bomba, tubulação e suporte para a estrutura metálica fixada na parede.

Figura 13 – Suporte de plástico

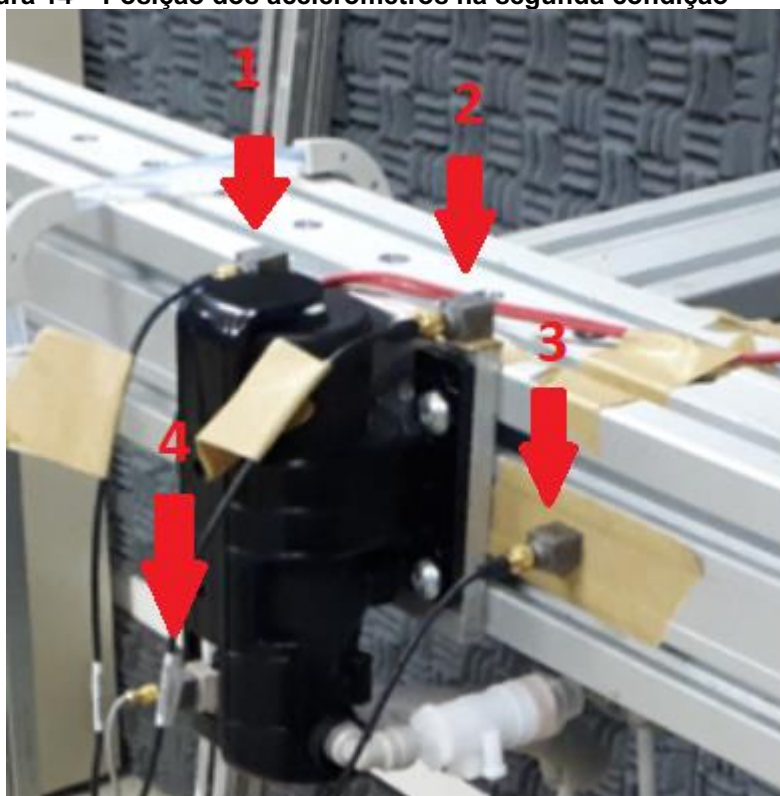


Fonte: Autoria própria

O layout hidráulico se manteve inalterado para esta condição e o mesmo procedimento de medição foi aplicado, respeitando os 2 minutos de funcionamento do sistema antes da captação dos dados.

Neste design, quatro acelerômetros foram utilizados e aplicados conforme a figura 14. O acelerômetro 1 foi aplicado no corpo da bomba, enquanto o 4 no extremo inferior, conforme feito para a primeira condição. O acelerômetro 2 foi fixado na placa metálica de conexão com a estrutura e o 3 diretamente na estrutura.

Figura 14 – Posição dos acelerômetros na segunda condição



Fonte: Autoria própria

Desta forma, o conjunto bomba, suporte e tubulação atuou como componente ativo enquanto a estrutura era o componente passivo do sistema.

5.3 TERCEIRA CONDIÇÃO DE ACOPLAMENTO

Na terceira condição o suporte plástico se manteve e a alteração se deu pela adição de uma placa metálica, que é utilizada em produto entre o conjunto suporte bomba e a carcaça.

Figura 15 – Terceira condição de acoplamento

Fonte: Autoria própria

Neste design, a intenção foi entender a contribuição da chapa metálica para a dissipação de energia e definir se a conexão entre o suporte e a placa era ou não um ponto crítico neste aspecto. Novamente o conjunto bomba e tubulações se manteve inalterado. O procedimento de medição foi idêntico aos executados nas outras duas condições.

Figura 16 – Posição dos acelerômetros na terceira condição

Fonte: Autoria própria

Foram aplicados 5 acelerômetros no sistema conforme ilustrado na figura 16. Os acelerômetros 1 e 4 novamente foram posicionados no corpo e no extremo inferior da bomba enquanto o 2 foi fixado na chapa metálica e os acelerômetros 3 e 5 foram colocados na estrutura metálica. Neste, o grande objetivo foi entender o nível de vibração da estrutura após a aplicação da placa entre o suporte e a mesma, e por isso o sistema suporte, chapa, bomba e tubulações atuou como o agente ativo enquanto a estrutura como passivo.

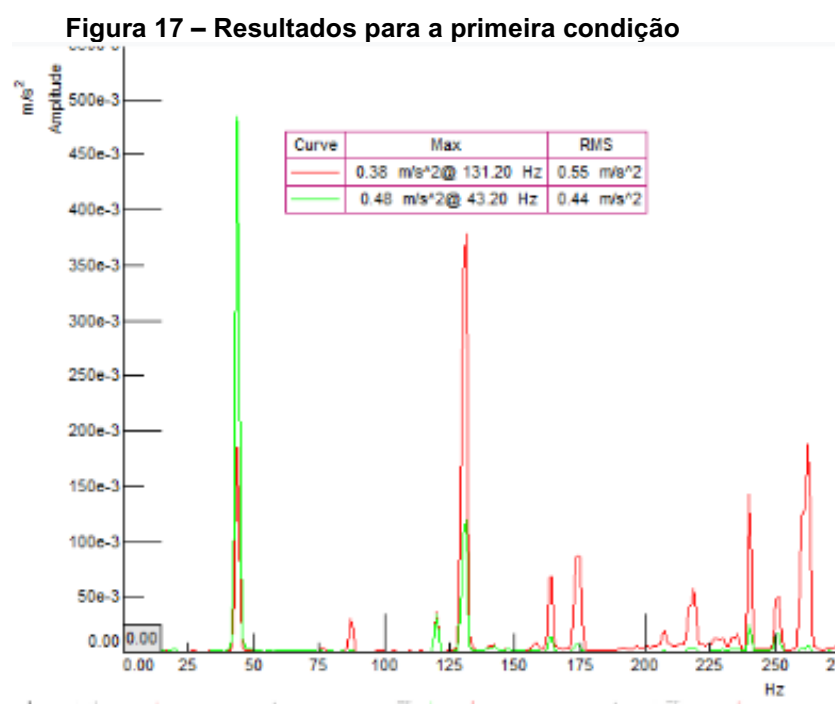
6 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Para melhor compreensão e absorção dos resultados apresentados, esta seção será subdividida. Assim, cada condição de acoplamento testada será discutida.

6.1 PRIMEIRA CONDIÇÃO DE ACOPLAMENTO

Esta condição contava com as chapas espessas de alumínio envolvendo a bomba. Neste caso, o objetivo era entender como o sistema iria se comportar quando envolto por uma estrutura rígida.

A figura 17 apresenta o gráfico obtido com as medições nesta condição.



Fonte: Autoria própria

A curva vermelha, com pico RMS de $0,55 \text{ m/s}^2$ representa a oscilação equivalente entre os acelerômetros 1 e 4 (ilustrados na figura 12). Esta corresponde a vibração da bomba, com um pico de oscilação em 130Hz e outro em 267Hz.

Nota-se que ela também apresenta um valor alto para a frequência de 45Hz e isso se dá por um fenômeno que não era esperado antes das medições: A oscilação da bomba excitou a frequência crítica de vibração da estrutura.

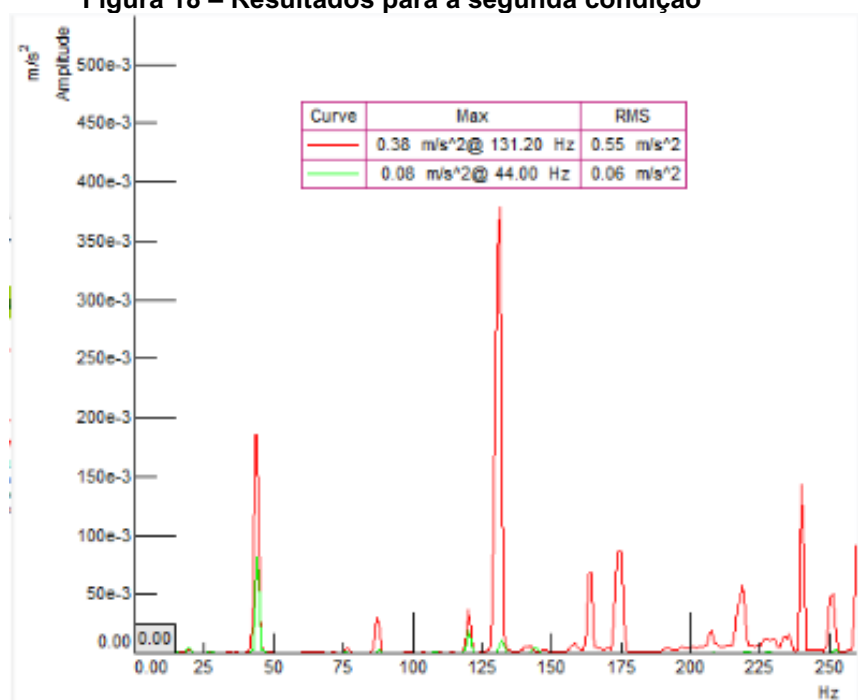
Isto é ilustrado pela curva verde, que representa a oscilação equivalente entre os acelerômetros 2 e 3, ou seja, toda a vibração da estrutura acoplada na parede. Este pico na amplitude de oscilação da estrutura para 45Hz não era previsto, já que como este se trata de um método totalmente experimental, não possuíamos dados de frequência natural de nenhum dos componentes.

Durante o experimento, foi possível ouvir um ruído não característico para este sistema, o que ficou comprovado após as medições. Essa característica de excitação, ainda que não fosse ressonante a ponto de danificar componentes do sistema, fez com que o resultado fosse desconsiderado, afinal não foi possível entender a real parcela de energia transmitida durante o funcionamento da bomba.

6.2 SEGUNDA CONDIÇÃO DE ACOPLAMENTO

Para esta condição, era esperado que o suporte de plástico apresentasse índices de amplitude de vibração elevados, principalmente por seu modo de fixação na estrutura, dado por parafusos e sem a presença de nenhum modelo de amortecedor (gromets ou vibra-stops).

Figura 18 – Resultados para a segunda condição



Fonte: Autoria própria

Os resultados para esta condição estão ilustrados na figura 18. Novamente, a curva vermelha representa a oscilação equivalente entre os acelerômetros 1 e 4 (bomba), enquanto a verde corresponde a equivalência de oscilações entre os acelerômetros 2 e 3.

Neste caso, foi possível notar que a característica de vibração da bomba se manteve idêntica à condição anterior. O que se alterou foi a curva da estrutura, que apresentou índices muito menores de amplitude.

A substituição das placas de alumínio pelo suporte de plástico fez com que o pico de vibração da estrutura em 45Hz diminuísse. Isso se dá pela presença de espuma na parte interna do suporte de plástico, o que faz com que certa parcela da energia transmitida pela bomba seja amortecida, e previne efeitos e consequências como a excitação causada na condição anterior.

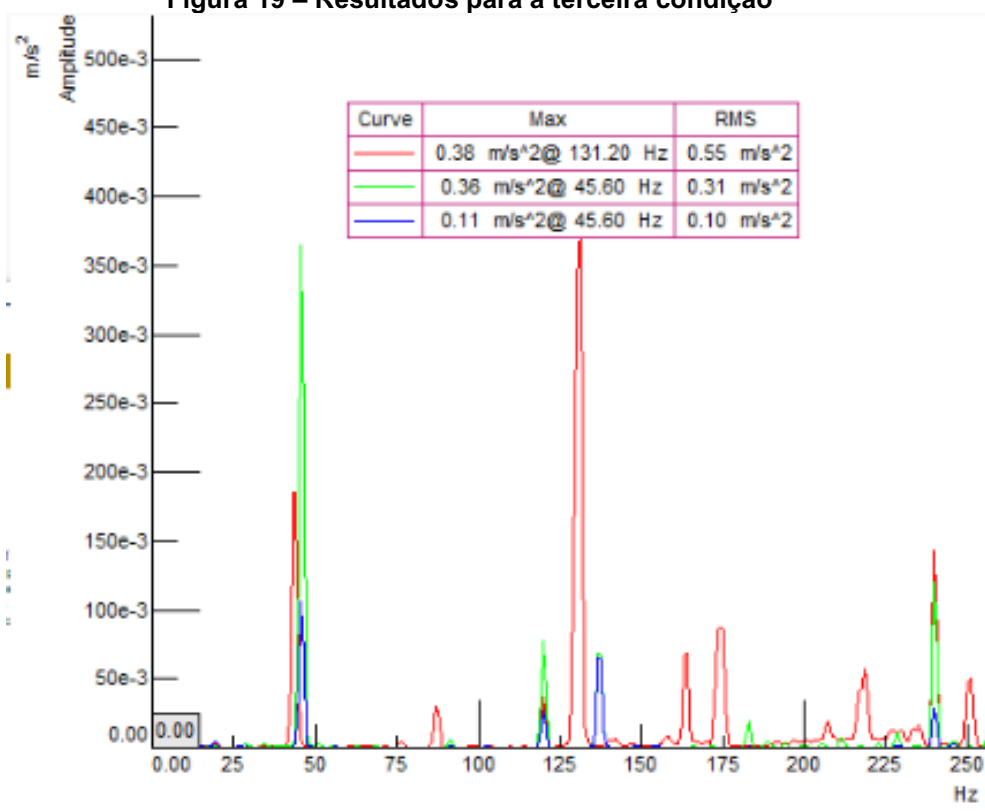
6.3 TERCEIRA CONDIÇÃO DE ACOPLAMENTO

Esta era a condição que de fato simulava com assertividade o layout do sistema, e para ela seria necessário entender como o resultado se apresentava comparado ao da última condição.

Conforme o resultado, seria possível afirmar que a chapa de alumínio aplicada entre o suporte e a estrutura (base do produto) contribuía na dissipação de energia e assim assumir que o problema estava no suporte de plástico ou então seriam necessárias ações para conter a transmissão de vibração entre o suporte e a placa.

Os resultados para esta condição estão explícitos na figura 18.

Figura 19 – Resultados para a terceira condição



Fonte: Autoria própria

Este gráfico apresenta uma característica diferente dos anteriores. Conforme mostrado na figura 16, três componentes foram medidos. A bomba, pelos acelerômetros 1 e 4 e representados pela curva vermelha. A chapa, medida pelo acelerômetro 2, representada pela curva verde. E por fim, a estrutura, medida pelos acelerômetros 3 e 5 e representada pela curva azul.

É perceptível que a curva de vibração da bomba se manteve inalterada para esta condição, enquanto a curva da estrutura apresentou aumento na oscilação em frequências como 45Hz e 130Hz.

É notável, porém, que a presença da chapa não só acentuou a vibração da estrutura nos mesmos 45Hz (de 0,06 ms² RMS para 0,10 m/s² RMS) como ainda apresentou ela mesmo uma oscilação relevante. Com pico de 0,31 m/s² RMS para a frequência de 45Hz, é possível identificá-la como componente crítico de oscilação do sistema.

Por questões de layout, é inviável aplicar uma condição de acoplamento como a segunda dentro do produto, e por isso entende-se que apesar da chapa ser o

componente crítico, qualquer solução deverá consistir em amenizar os efeitos de transmissão dados entre o suporte e a mesma.

6.4 PROPOSTA DE SOLUÇÃO

Dados os resultados, é possível identificar a chapa de alumínio como componente crítico do sistema. Ainda que ela seja indispensável para o layout do produto, se fazem necessárias ações de contingência para a transmissão entre o suporte de plástico e a mesma.

Uma das ações poderia estar ligada à conexão entre os dois componentes, que hoje é dada por parafusos e pode ser aperfeiçoada com a adição de um gromet como ilustrado na figura 20.

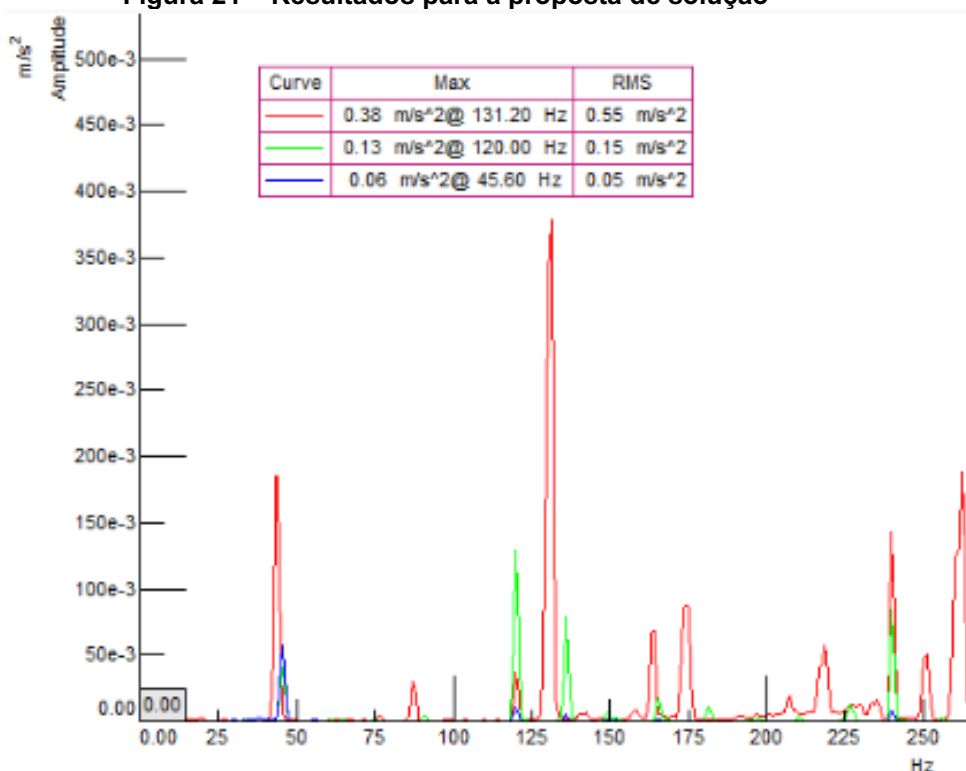
Figura 20 – Proposta de solução



Fonte: Autoria própria

A tendência é que o amortecedor atue absorvendo parcela da energia transmitida pelo componente ativo. Desta forma, visando validar a proposta, este modelo de acoplamento foi testado seguindo o procedimento aplicado para todas as outras condições e o resultado é apresentado na figura 21.

Figura 21 – Resultados para a proposta de solução



Fonte: Autoria própria

Os acelerômetros foram posicionados conforme a terceira condição e novamente a curva vermelha representa a bomba, a verde representa a chapa e a azul a estrutura.

Fica claro que a presença do amortecedor seria de grande efetividade para a redução de amplitude em frequências críticas como a de 45Hz. Para a curva da estrutura como um todo, o pico RMS saiu de 0,10ms² para 0,05 ms², o que comprova a efetividade da solução.

7 CONCLUSÃO

A partir dos resultados apresentados pela TPA, foi possível concluir que o componente crítico do sistema é a chapa de alumínio localizada entre o suporte de plástico e a estrutura.

O trabalho provou também que a TPA pode ser bastante efetiva para o desenvolvimento de produtos como um todo quando aplicada na identificação de componentes de alta criticidade e desenvolvimento de soluções rápidas de contingência como a proposta de aplicar um gromet entre os dois componentes.

REFERÊNCIAS

BIRAJDAR, R.; PATIL, R.; KHANZODE, K. **Vibration and Noise in Centrifugal Pumps: Sources and Diagnosis Methods**. Porto: 3rd International Conference on Integrity, Reliability and Failure, 2009.

BLAKE, Ralph E. **Harris' Shock and Vibration Handbook**. 5. ed. Nova Iorque: Mcgraw-hill, 2002. Capítulo 2.

DÜRRER, Bernd; WURM, Frank-hendrik. **Noise sources in centrifugal pumps**. Dortmund: WSEAS Int. Conference on Applied and Theoretical Mechanics, 2006.

DEPARTMENT, Environmental Protection. **Good Practices on Pumping System Noise Control**. Hong Kong: Environmental Protection Department, 2005.

IBGE. **Domicílios particulares permanentes, por posse de filtro de água**. 2015. Disponível em: <<https://seriesestatisticas.ibge.gov.br5>>. Acesso em: 21 out. 2019.

KELLY, S. Graham. **Mechanical Vibrations: Theory and Applications**. Stamford: Cengage Learning, 2012.

KLERK, D. de; OSSIPOV, A. **Operational Transfer Path Analysis: Theory, Guidelines & Tire Noise Application**. Belgium: Isma, 2010. 24 v.

MEIROVITCH, Leonard. **Fundamentals of Vibrations**. Singapore: Mcgraw-hill, 2001.

MUCHERONI, Mário Francisco. **Dinâmica de Sistemas Discretizados Vibrações Mecânicas**. São Carlos: Universidade de São Paulo, 2012.

PLUNT, Juha. **Finding and fixing vehicle NVH problems with transfer path analysis**. Suécia: Sound & Vibration, 2005. 39 v.

ROCHA, Leonardo Zanetti. **Estratégias para Redução de Ruído em Bomba Hidráulica Automotiva**. Florianópolis: Universidade Federal de Santa Catarina, 2012.

SEIJS, M. van Der et al. **A robust Transfer Path Analysis method for steering gear vibrations on a test bench**. Germany: Isma, 2014.

SILVA, Samuel da. **Vibrações Mecânicas**. Foz do Iguaçu: Universidade Estadual do Oeste do Paraná, 2009.

SITTER, Gert de; GUILLAUME, Patrick; DEVRIENDT, Christof. **Operational Structural Transfer Path Analysis**. Cairns: 14th International Congress On Sound & Vibration, 2007.

SOEIRO, Newton Sure. **Apostila de Fundamentos de Vibrações e Balanceamento de Rotores**. Belém: Universidade Federal do Pará, 2008.

TCHERNIAK, D.; SCHUHMACHER, A. P. **Application of Transmissibility Matrix Method to NVH Source Contribution Analysis**. Orlando: The Society for Experimental Mechanics, 2009.