

APLICAÇÃO DA FORMA DE DEFLEXÃO OPERACIONAL (ODS) PARA DIAGNOSTICO DE RIGIDEZ DE BASE EM UMA BANCADA EXPERIMENTAL

Ana Claudia Marques⁽¹⁾ (marques.anac@outlook.com), Josué Natan Silva⁽¹⁾ (josuenatan@ymail.com),
Lucas Costa Brito⁽²⁾ (brito.lcb@gmail.com), Jorge Nei Brito⁽¹⁾ (brito@ufsj.edu.br)

⁽¹⁾ Universidade Federal de São João del Rei (UFSJ); Departamento de Engenharia Mecânica e de Produção (DEMEP)

⁽²⁾ Universidade Federal de Uberlândia (UFU); Faculdade de Engenharia Mecânica (FEMEC)

RESUMO: A análise da Forma de Deflexão Operacional, do inglês "Operational Deflection Shape" (ODS), é uma técnica de manutenção preditiva que possibilita conhecer o comportamento vibracional de um equipamento ou estrutura, cuja excitação seja desconhecida. A ODS relaciona o movimento dos pontos das malhas de um sistema a outro de referência, dentro da mesma, determinando o Grau de Liberdade. Buscando uma opção mais assertiva e rápida para conseguir solucionar os altos níveis de vibração da bancada didática, optou-se por utilizar a análise da Forma de Deflexão Operacional em vez de trabalhar com hipóteses de tentativa e erro. Neste trabalho identificou-se o comportamento dinâmico da bancada experimental e os lugares que possuíam maior problema de rigidez. Os resultados das simulações possibilitaram realizar intervenções pontuais na base da bancada. Para verificar se o problema havia sido corrigido, fez-se uma nova ODS da bancada. Apesar de não ter sido feita todas as correções necessárias, as realizadas diminuíram consideravelmente os níveis de vibração da bancada.

PALAVRAS-CHAVE: Forma de Deflexão Operacional (ODS), Vibração, Microlog GX, ME'scopeVES™

APPLICATION OF OPERATING DEFLECTION SHAPE (ODS) FOR BASIC RIGIDITY DIAGNOSIS IN AN EXPERIMENTAL BENCH

ABSTRACT: The analysis of the Operation Deflection Shape is a predictive maintenance technique that makes it possible to know the vibrational behaviour of an equipment or structure, whose excitation is unknown. The ODS relates the movement of mesh points from one system within it, determining the Degree of Freedom (DOF). Searching for a more assertive and quicker option to solve the high levels of vibration of the didactic bench, it was decided to use the Operation Deflection Shape analysis instead of working with hypotheses of trial and error. The objective of this work is to identify the dynamic behaviour of the experimental bench and points that had the greatest stiffness problem. The results of the simulations were satisfactory and made it possible to carry out specific interventions at the base of the bench. To verify if the problem had been corrected, a new bench ODS was made. Although not all the necessary corrections have been made, the ones made have considerably reduced the bench vibration levels.

KEYWORDS: Operating Deflection Shape (ODS), Vibration, Microlog GX, ME'scopeVES™

1. INTRODUÇÃO

A manutenção é uma área muito importante dentro das indústrias e vem ganhando cada vez mais espaço no campo das pesquisas. Com o avanço da tecnologia tem surgido cada vez mais novas técnicas e métodos para diagnósticos de falhas mecânicas e elétricas.

A manutenção com base no estado do equipamento, mais conhecida como manutenção preditiva ou controlada, consiste no acompanhamento dos maquinários durante o seu funcionamento. Esse monitoramento permite que os equipamentos trabalhem pelo maior tempo possível sem falhar e reduz o número de manutenções preventivas e corretivas.

Segundo Oliveira (2018), o estudo sobre métodos de manutenção preditiva se faz cada dia mais presente, a fim de evitar falhas inesperadas, aumentar confiabilidade nos equipamentos, diminuir gastos desnecessários e aumentar a vida útil de máquinas.

Existem várias técnicas preditivas, sendo as principais a análise de vibração, inspeção visual, análise de temperatura, medição de espessura, estroboscópio, detecção de vazamentos, detecção de defeitos em materiais metálicos, análise de lubrificante, medidor de pulsos de choque e alinhamento de máquinas rotativas.

Apesar da análise de vibração ser uma das mais antigas técnicas preditivas, ela ainda se mantém como uma das principais. Segundo Costa (2013), a análise de vibração não repara a falha. Ela indica a possível origem da causa da vibração e suas consequências, ficando a cargo dos responsáveis executarem os devidos reparos no equipamento.

De acordo com Andretta (2017), a caracterização dinâmica da estrutura pode ser realizada pelo estudo dos modos de vibrar da mesma. Esse estudo possibilita a obtenção da matriz de amortecimento, bem como, a obtenção dos modos de vibrar da estrutura. Isto possibilitará o entendimento dos fatores nocivos a determinadas estruturas, verificando se necessário tomar medidas preventivas que podem, em longo prazo, viabilizar a longevidade da estrutura, até mesmo vigorar novas técnicas de construção que possam considerar de forma abrangente a minimização dos efeitos nocivos à estrutura frente às vibrações nela imposta.

Segundo Gevinski (2014), no que diz respeito às análises em condições operacionais, técnicas de análise da forma de deflexão operacional da estrutura ou, comumente conhecida como *Operating Deflection Shape* (ODS), e a Análise Modal Operacional (AMO) têm sido aplicadas com sucesso no monitoramento de máquinas e equipamentos. Ele também afirma que pela ODS é possível a identificação dos modos operacionais de deslocamento da estrutura. Na análise modal operacional,

os parâmetros modais, frequência natural, fator de amortecimento e modos naturais, são identificados apenas com medições das respostas operacionais das estruturas.

Sartori (2014) fez uma análise de um sistema dinâmico em funcionamento, baseando na Forma de Deflexão Operacional e comparou os resultados obtidos com a análise dos modos vibratórios do sistema pela medição das Funções de Resposta em Frequência (FRF).

Mishani (2017) utilizou a análise de ODS para verificar a vibração das máquinas. Seu trabalho se divide em duas partes principais, que são avaliação em máquinas rotativas e avaliação em máquinas alternativas.

Silva (2018) utilizou a análise de ODS para estudar como um sistema dinâmico se comportava em diferentes condições de alinhamento e quanto o acoplamento flexível influenciava no alinhamento do eixo.

Price (2019) fez uma comparação da forma de deflexão operacional com uma nova técnica de vídeo de amplificação de movimento para análise de vibração.

O objetivo deste trabalho é identificar por meio da análise da Forma de Deflexão Operacional (ODS) os pontos na estrutura da bancada didática que possui maiores amplitudes e propor soluções para minimizar o problema de rigidez. Os sinais de vibração foram coletados através do Microlog GX-75, tecnologia SKF. Posteriormente analisados no *software* ME'scopeVES™. Ambas as tecnologias estão disponíveis no LASID (Laboratório de Sistemas Dinâmicos) onde os testes experimentais foram realizados.

Por meio desta pesquisa foi possível compreender o comportamento dinâmico da bancada de teste e sugerir ações corretivas, o que reduziu consideravelmente o problema de rigidez de base. Este estudo beneficiará pesquisadores, profissionais da área de manutenção e alunos do curso de engenharia mecânica.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

2.1. ODS - *Operating Deflection Shape*

A análise da Forma de Deflexão Operacional, do inglês *Operating Deflection Shape* (ODS), é um método utilizado para identificar o comportamento vibracional de uma máquina ou estrutura em um determinado instante de tempo ou frequência cuja excitação possa ser desconhecida.

O objetivo da ODS é relacionar o movimento dos pontos das malhas de um sistema a outro ponto de referência dentro dela, determinado o Grau de Liberdade (DOF) da estrutura.

De acordo com Sartori (2014), a análise da Forma de Deflexão Operacional é feita a partir da relação de movimento entre um ponto de referência e os outros pontos da malha com o objetivo de informar o quanto a estrutura está movimentando, qual ponto movimenta-se mais e em qual direção, se a ressonância é excitada e como se parece o modo vibração e, finalmente, se podem ser aplicadas ações corretivas para reduzir os níveis de vibração e ruídos.

A forma como a estrutura vibra é tradicionalmente conhecida como modo operacional. Por meio da ODS, é possível identificar os modos operacionais de deslocamento do sistema que está sendo analisado.

Segundo Gevinski (2014), o modo operacional pode ser compreendido como uma forma de vibrar cuja frequência da vibração não coincide necessariamente com uma das frequências naturais do sistema. Em uma frequência qualquer, o modo operacional será uma combinação linear dos modos próprios do sistema, contendo a contribuição de todos os modos.

Vibrações mecânicas podem ser compostas por vibrações forçadas e/ou vibrações de ressonância. O que difere a ODS das outras formas modais é a presença de vibrações forçadas, pois nas formas modais são apresentadas apenas vibração ressonante enquanto na ODS apresentam os dois tipos de vibração.

Ainda segundo Gevinski (2014), o comportamento dinâmico de estruturas pode ser avaliado a partir dos parâmetros modais do sistema, (modos próprios, frequência natural e fator de amortecimento), sejam eles estimados através da análise modal numérica, experimental ou operacional. Entretanto, em algumas situações, apenas o conhecimento da forma de vibrar, em um determinado instante de tempo ou frequência, pode ser suficiente para o entendimento e avaliação do comportamento dinâmico das máquinas, equipamentos ou estruturas. Para tal, as técnicas de Análise da Forma de Deflexão Operacional, do inglês *Operating Deflection Shape* (ODS) podem ser utilizadas.

De acordo com Souza (2014), a Análise Modal Experimental (AME) é um conjunto de técnicas experimentais e modelos utilizados para identificação de parâmetros modais em estruturas, máquinas e equipamentos. Ela segue uma ordem inversa à análise teórica. Recebe este nome quando os parâmetros modais são identificados conhecendo-se a força de excitação e as técnicas empregadas.

Ainda segundo Souza (2014), a determinação dos parâmetros modais utilizando somente os dados de resposta do sistema, onde as excitações originam-se, por exemplo, da própria operação da máquina ou equipamento, é chamada Análise Modal Operacional (AMO).

De acordo com Gevinski (2014), a AMO segue a mesma ordem inversa da AME, inicia-se pelo Modelo Resposta, onde são medidos os sinais de vibração na estrutura, passa pelo Modelo Modal, onde são determinadas as propriedades modais tais como discretização dos graus de liberdade, e é finalizada pelo Modelo Estrutural, onde é possível concluir a AMO observando os modos de vibração de interesse. A discretização deve ser feita de tal modo que o sistema possa ser observável, ou seja, dependendo do comprimento de onda analisado, a discretização deve ser mais refinada ou não, para que o número de informações medidas seja suficiente para gerar um modelo adequado da estrutura.

Segundo Sartori (2014), cada modo é definido por uma frequência natural específica, enquanto a ODS pode ser definida em qualquer frequência. Formas modais são apenas encontradas em estruturas lineares e estacionárias, são usadas para caracterizar vibração ressonante, não dependem de força ou cargas, somente mudam se as propriedades dos materiais ou condições de contorno mudam e não têm valores ou unidades fixas. Enquanto a ODS pode ser definida pela não-linearidade e não-estacionariedade e dependência de forças ou cargas, FRFs mudarão caso os modos ou cargas mudem e ODS têm unidades e valores únicos.

2.2. ME'scopeVES™

O ME'scopeVES™, é um *software* da *Vibrant Technology* que possui diversos pacotes que possibilitam resolver problemas de ruído e vibração de uma maneira rápida e econômica. O objetivo deste *software* é facilitar a análise e documentação de problemas encontrados através da análise experimental multicanal ou dados do domínio da frequência coletados durante a vibração da estrutura ou funcionamento do equipamento.

O ME'scopeVES pode ser usado para aquisição de dados e processamento de sinais, análise ODS, AME, AMO, Análise Acústica e Vibro-Acústica, dentre outros". (SOUZA, 2014). "MEscope, usa modelos animados em 3D, vídeos e ferramentas de pós-processamento líderes do setor para transformar dados em soluções e ações. (VIBRANT, 2020).

2.3. Bancada de Testes

Os testes experimentais foram desenvolvidos no Laboratório de Sistemas Dinâmicos (LASID), do Departamento de Engenharia Mecânica (DEMEC), da Universidade Federal de São João del-Rei (UFSJ). A bancada de testes, Figura 1, é composta por um Varivolt trifásico [1], um motor de indução trifásicos [2] WEG, 2 CV, 1750 rpm, 220V, 60 Hz, 4 polos, rolamentos 6204 e 6205 SKF, um motor CC

funcionando como gerador de corrente contínua [3] MOTRON M610-VIRB-2K, 0,5 CV, 2000 rpm, rolamentos 6203 e 6205 SKF, um resistor [4] um Varivolt monofásico [5].

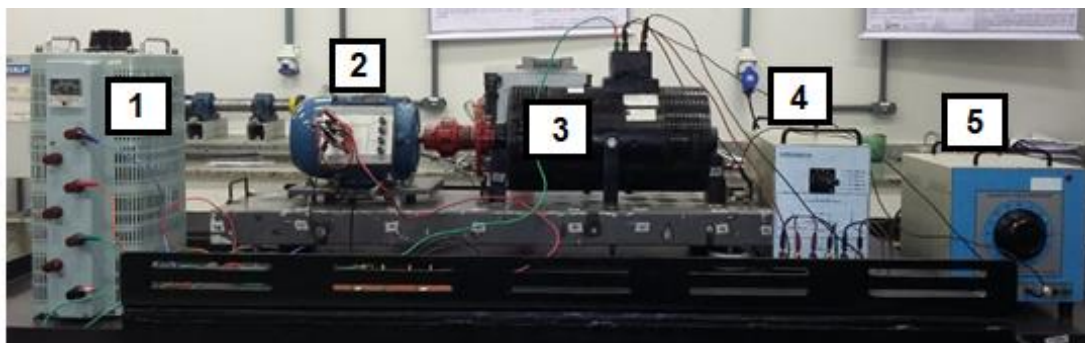


FIGURA 1. Bancada de Teste. Fonte: Autora (2020).

Os sinais de vibração foram coletados pelo coletor de dados *Microlog GX-75™* e dois acelerômetros modelo "CMSS2200", com sensibilidade de 100 mV/g.

3. METODOLOGIA

A metodologia para a análise do sistema dinâmico constituiu na coleta de dados de vibração com a bancada em funcionamento, construção da ODS, análise dos resultados, aplicação de melhorias, repetição deste processo e comparação dos resultados. A análise do sistema é feita pela medição da malha que é discretizada proporcionalmente no sistema real e na estrutura desenvolvida no *software* para ser analisada, Figura 2.

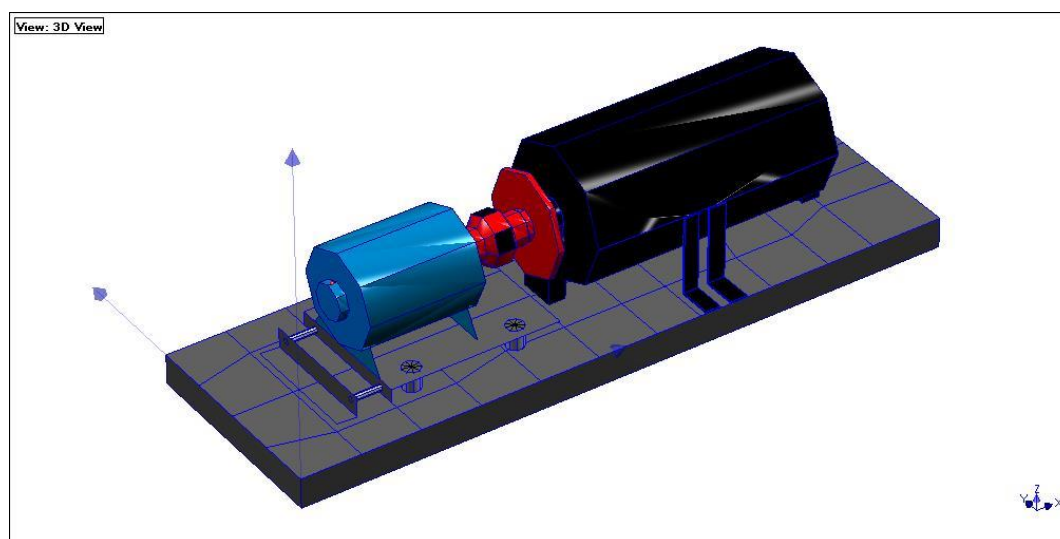


FIGURA 2. Estrutura desenvolvida no *software*. Fonte: Autora (2020).

A versão 5.2.2012.0427 do *software* ME'scopeVES™ permite a criação de modelo da estrutura de forma simplificada utilizando apenas pontos, linhas, superfícies triangulares e quadradas e manipulação de coordenadas. Sendo desta forma um desenho simplificado do sistema mecânico, mas suficiente para se realizar as análises de forma eficiente e ágil.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Para fazer a análise da ODS foram selecionados 92 pontos na bancada nos locais considerados mais propensos a atingirem maiores níveis de vibração e os que poderiam representar o movimento geral do sistema. Estes pontos estavam na base e nos mancais dos motores, Figuras 3 e 4, sendo cada um com uma direção de liberdade *X*, *Y* ou *Z*.

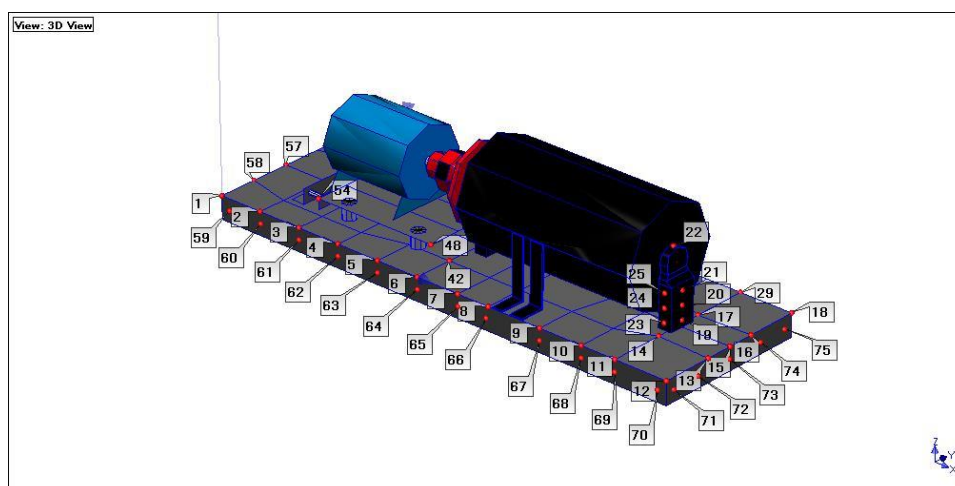


FIGURA 3. Vista panorâmica dos pontos coletados. Fonte: Autora (2020).

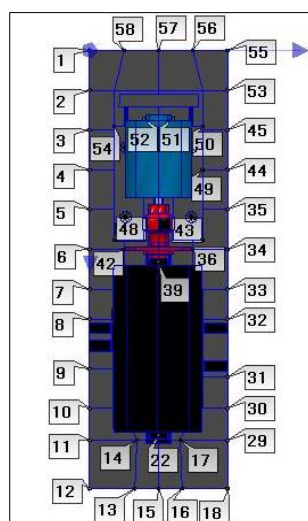


FIGURA 4. Vista superior dos pontos coletados. Fonte: Autora (2020).

4.1. Condição Inicial

Após a coleta, os dados foram importados para o *software* ME'scopeVES™ para a análise ODS do sistema. O foco das análises foi na faixa de frequência de 0 a 100 Hz, por contemplar a frequência de excitação promovida pelo movimento rotacional do motor de indução trifásico [2] de 30 Hz, seus primeiros harmônicos de 60 Hz e 90 Hz, respectivamente.

Na Figura 5 tem-se a sobreposição de todos os espectros da Função de Resposta em Frequência (FRF) dos 92 pontos coletados.

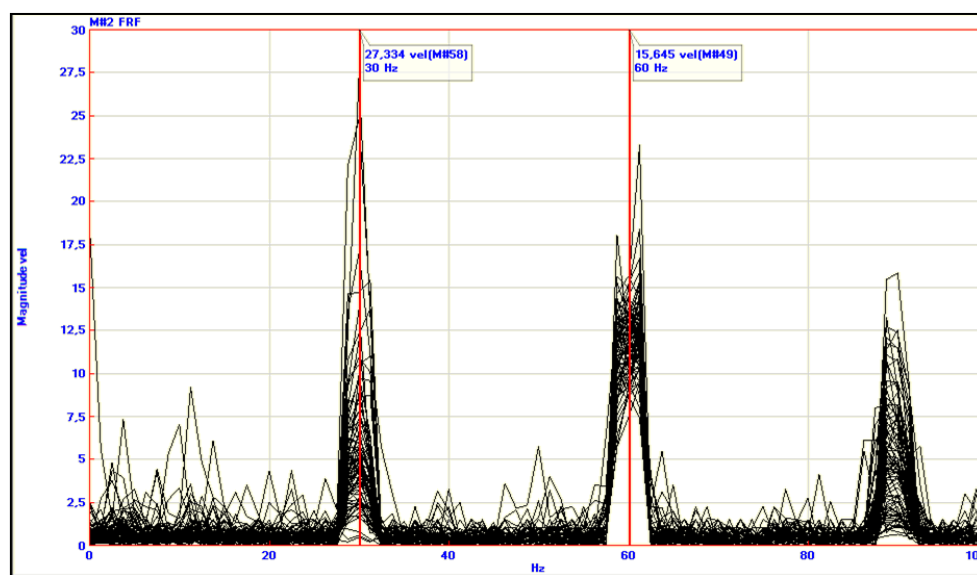


FIGURA 5. Espectro Vibração | Magnitude X Frequência | Condição Inicial. Autora (2020).

Na Figura 5, observa-se elevados níveis de magnitude na frequência de 30 Hz com o valor máximo de 27,334 mm/s, no primeiro harmônico, na frequência de 60 Hz, uma magnitude de 15,645 mm/s e no segundo harmônico, na frequência de 90 Hz, uma magnitude de 15,837 mm/s.

Sabe-se que os melhores parâmetros de severidade, na maioria das vezes, são informações do fabricante do equipamento. Porém na ausência dos dados do fabricante são utilizadas normas indicativas como ISO, VDI e DIN, ou ainda histórico de funcionamento do equipamento.

Segundo a Norma Técnica ISO 20816-1:2016, *Mechanical Vibration - Measurement and Evaluation of Machine Vibration*, amplitude de vibração em peças não rotativas de sistemas mecânicos acima de 9,3 mm/s é considerada normalmente de severidade suficiente para causar danos à máquina. Através da Figura 5, observa-se que diversos pontos superaram esta marca na

frequência de 30 Hz, frequência promovida pelo movimento rotacional do motor de indução trifásico, sendo indicada a manutenção imediata da bancada.

Nas Figuras 6 e 7, nota-se que os níveis mais altos de vibração foram alcançados no ponto 59 na frequência de 30 Hz e no ponto 17 na frequência de 60 Hz. A localização dos pontos com maiores amplitudes na frequência excitadora e nos seus harmônicos indicam a região da bancada que está sofrendo maior deformação.

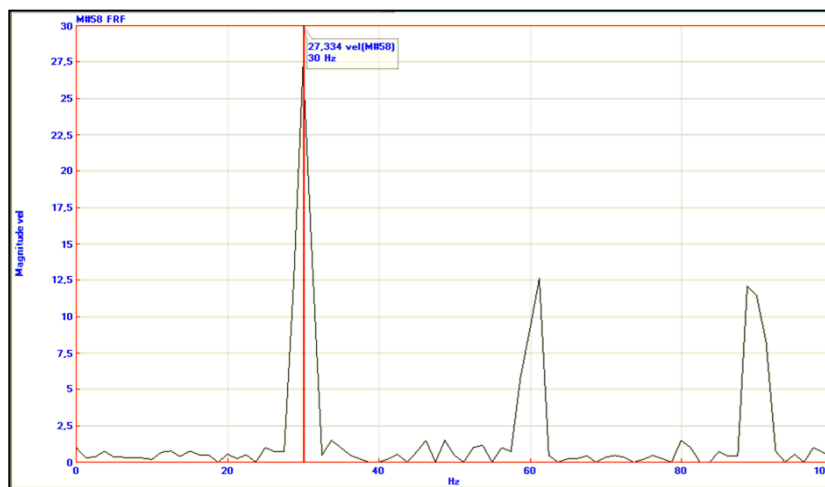


FIGURA 6. Espectro Vibração | Magnitude X Frequência | Ponto 59 | Condição Inicial. Fonte: Autora (2020).

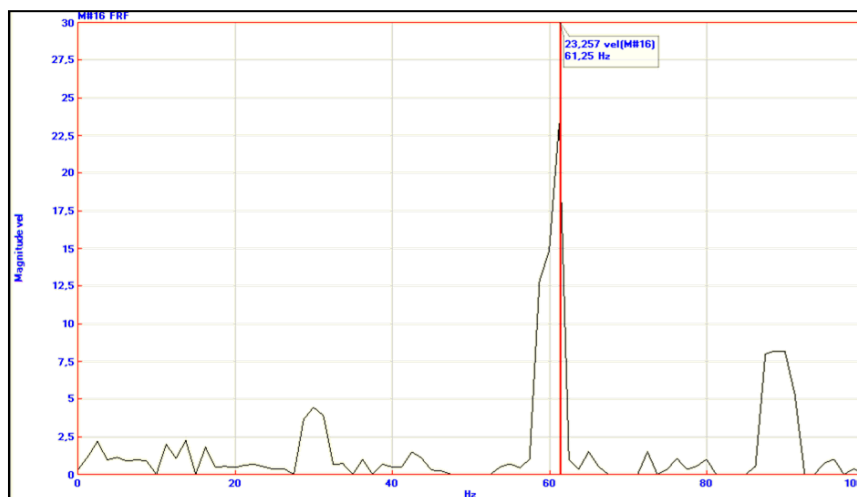


FIGURA 7. Espectro Vibração | Magnitude X Frequência | Ponto 17 | Condição Inicial. Fonte: Autora (2020).

Na Figura 8 tem-se o modelo computacional gerado pelo *software* na frequência de 30 Hz. Utilizou-se um interpolador interno para que os dados de posição dos pontos não medidos possam ser animados baseando nos valores dos pontos próximos a eles.

Verifica-se através da simulação e dos espectros de vibração uma maior amplitude na movimentação do sistema mecânico em uma das extremidades da bancada próximo a posição do motor de indução trifásico.

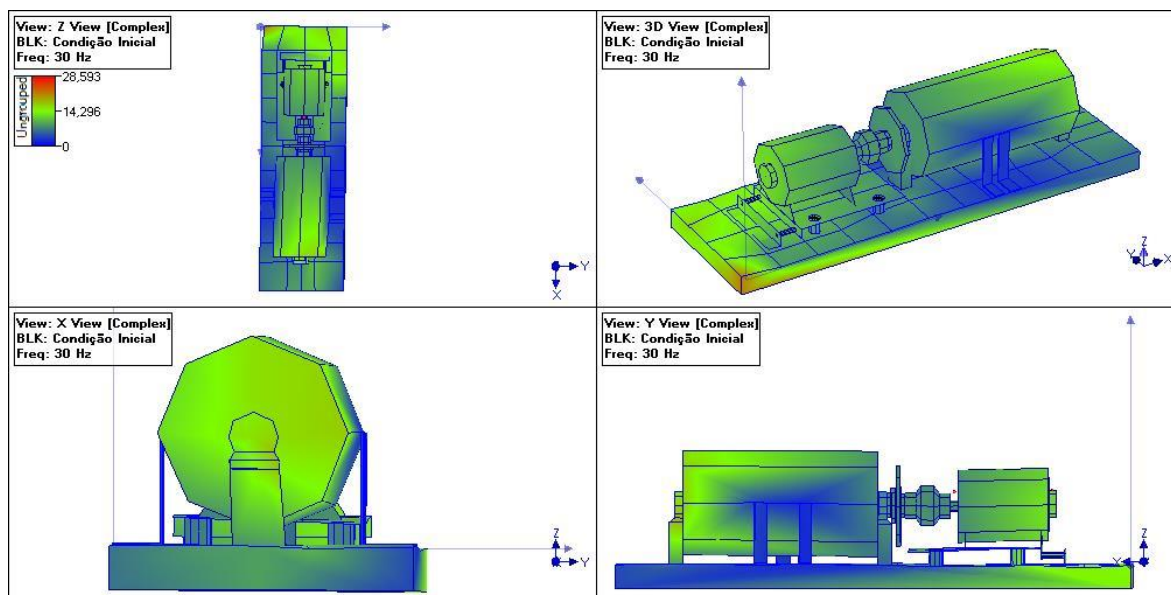


FIGURA 8. Modelo computacional na condição inicial. Fonte: Autora (2020).

4.1. Visualização do Sistema na Condição Final

A fim de diminuir os níveis de vibração e solucionar os problemas de rigidez de base evidenciados na condição inicial, foram soldadas chapas metálicas na parte inferior da bancada conforme mostra a Figura 9.



FIGURA 10. Reforços aplicados na bancada de teste. Fonte: Autora (2020).

Repetiu-se a coleta dos dados com o sistema na nova condição e os dados foram importados ao *software* para serem analisados.

Na Figura 10 tem-se a sobreposição de todos os espectros da Função de Resposta em Frequência (FRF) dos 92 pontos coletados na condição final apresentada neste estudo.

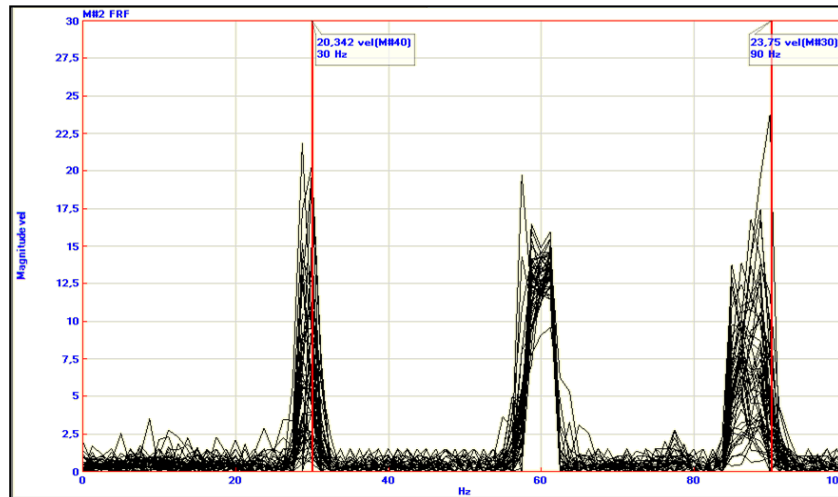


FIGURA 10. Espectro Vibração | Magnitude X Frequência | Condição final. Fonte: Autora (2020).

Observa-se que o nível máximo de vibração na frequência do Motor de indução trifásico, 30 Hz, abaixou em relação à condição inicial passando de 27,334 mm/s para 20,342 mm/s e no primeiro harmônico passou de 15,645 mm/s para 14,884 mm/s. Entretanto, no segundo harmônico, na frequência de 90 Hz houve um aumento dos níveis de vibração em um ponto específico, passando de 15,837 mm/s na condição inicial para 23,75 mm/s na condição final.

Quando se analisa ponto a ponto é possível observar que a maior amplitude de vibração na frequência de 30 Hz se alterou em relação à condição inicial, passando a ser a amplitude do ponto 49, Figura 11.

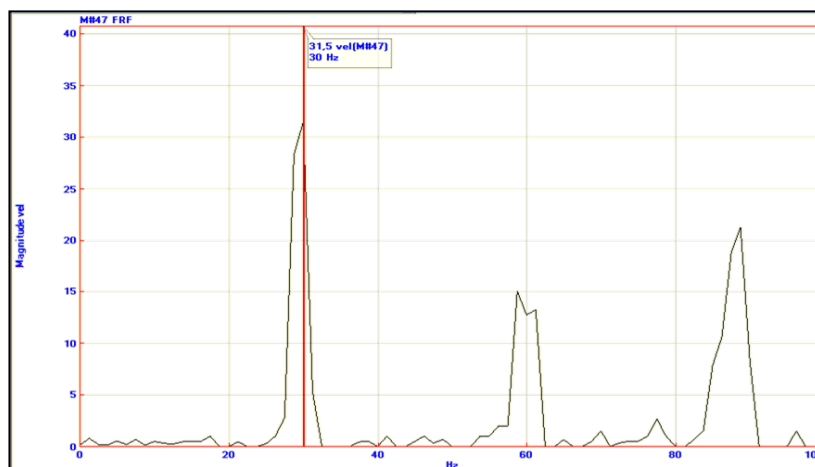


FIGURA 11. Espectro Vibração | Magnitude X Frequência | Ponto 49 | Condição Final. Fonte: Autora (2020).

O ponto que sofreu grande aumento na sua amplitude de vibração na frequência de 90 Hz em relação a condição inicial foi o ponto 32, Figura 12. Este aumento indica que a região do sistema onde este ponto esta localizado passou a sofrer maior deformação com a nova configuração.

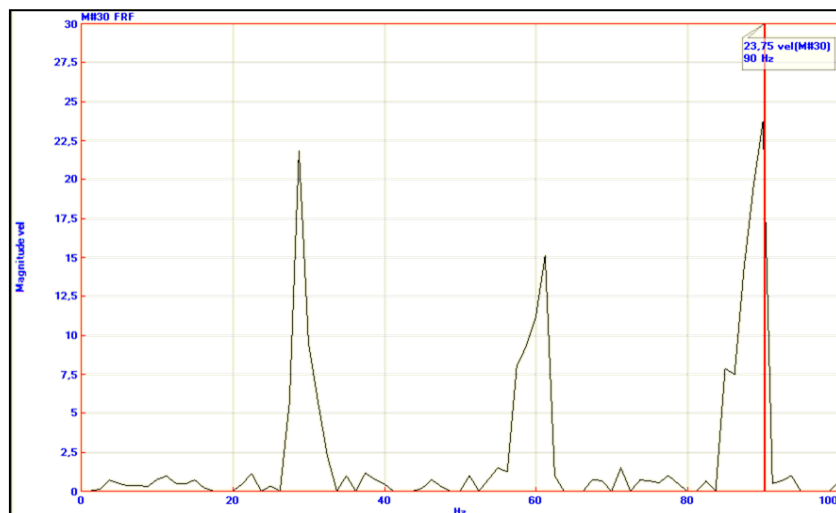


FIGURA 12. Espectro Vibração | Magnitude X Frequência | Ponto 32 | Condição Final. Fonte: Autora (2020).

Na Figura 13 tem-se a simulação gerada no ME'scopeVES™ com o sistema na condição final analisada na frequência de 30 Hz.

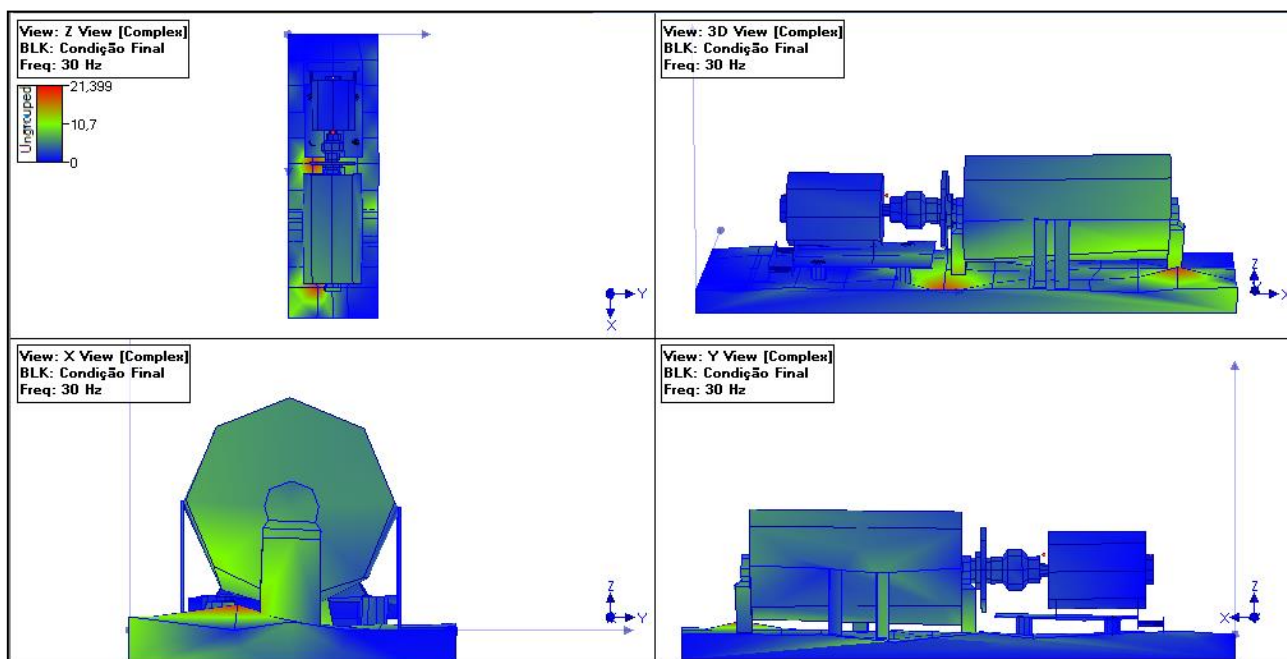


FIGURA 13. Modelo computacional na condição final. Fonte: Autora (2020).

De acordo com a simulação computacional e os espectros analisados é possível verificar que os pontos da bancada que apresentam maiores amplitudes estão próximos aos mancais do Motor CC.

4.2. Comparação condição Final X Inicial

A comparação das simulações do sistema pode ser observada na Figura 14.

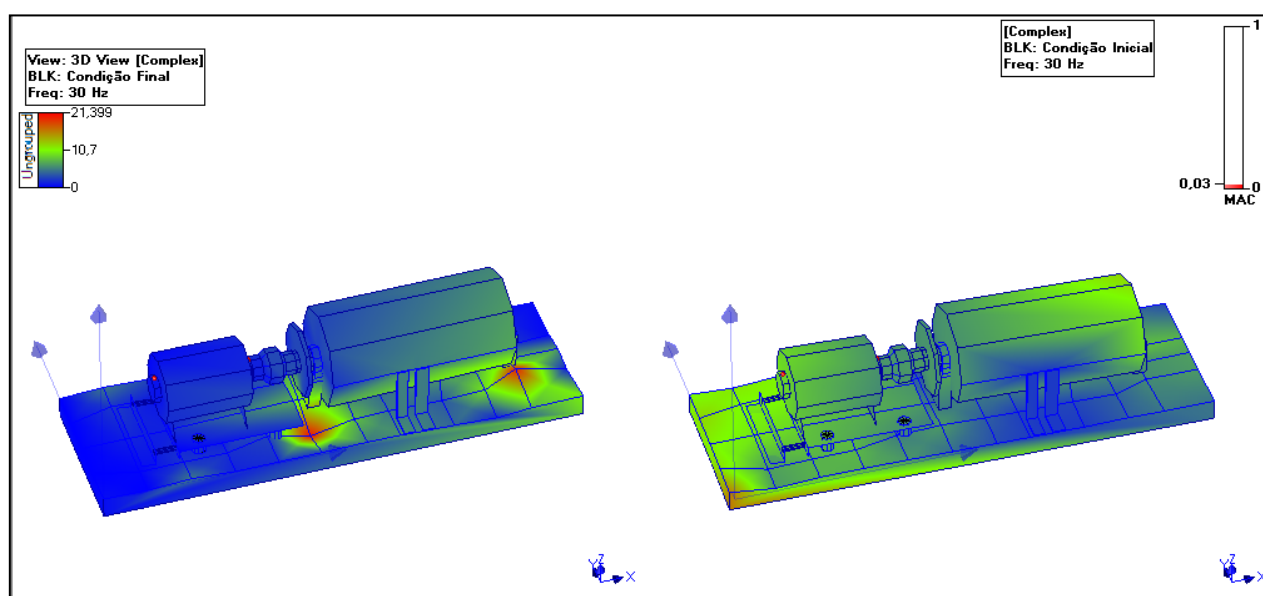


FIGURA 14. Modelo computacional comparando as condições do sistema. Fonte: Autor.

Comparando-se as duas condições é possível concluir que os reforços aplicados na base da bancada corrigiram de forma considerável o problema de rigidez da base do sistema. Nota-se que a grande movimentação existente na condição inicial próximo ao motor de indução trifásico, lado direito da figura 14, não se repete na condição final, lado esquerdo. O número de MAC (*Modal Assurance Criterion*) gerado pelo software foi de 0,03. Valores próximos a zero, mostram que os modos de vibração em comparação não se correlacionam não havendo portanto similariedade entre os modos e cmoo Valores também indica que não houve similariedade entre os dois modos comprovando a melhoria.

Atráves do resultado alcançado na simulação da condição final, lado esquerdo da figura 14, conclui-se que os altos níveis de vibrações ainda gerados nesta situação e inaceitáveis pelos padrões internacionais possuem como causas outros problemas mecânicos além da rigidez de base.

O posicionamento, a forma da simulação próximos aos mancais do Motor CC e os espectros de vibrações obtidos neste trabalho sugerem que a bancada ainda possui problemas de eixo empenado e rolamentos deteriorados. A identificação e correção destes problemas, embora sejam interessantes, não foram abordados neste trabalho.

5. CONCLUSÃO

A análise da Forma de Deflexão operacional se mostra uma ferramenta valiosa para a área de manutenção e está ganhando cada vez mais espaço não só no campo das pesquisas como também nos meios industriais.

Por meio da ODS foi possível identificar o comportamento dinâmico da bancada e montar um banco de dados que auxiliará na melhoria da própria estrutura e de outras semelhantes.

Com o auxílio da análise da Forma de Deflexão Operacional intervenções pontuais foram realizadas, em vez de trabalhar com hipóteses de tentativa e erro. Essa análise se mostra eficaz, pois é capaz de fornecer aos profissionais toda a visualização do sistema mecânico e possíveis causas de problemas.

O objetivo principal do trabalho foi alcançado já que os problemas estruturais foram solucionados conforme resultados obtidos na simulação. Por outro lado, destaca-se que ainda existem problemas de vibração relacionados ao eixo empenado e aos rolamentos deteriorados, que por não serem objetivos do trabalho, não foram corrigidos. As correções destes problemas ainda existentes na bancada ficam como sugestões para novos estudos envolvendo a ODS.

REFERENCIAS

ANDRETTA, E. R. Z. Estudo numérico de problemas acoplados envolvendo a resposta dinâmica das estruturas. Dissertação - Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Pato Branco, 107p., 2017.

BSI, S. P. *Mechanical vibration - Measurement and evaluation of machine vibration*. BS ISO 20816-1:2016, *The British Standards Institution*, Disponível em: <<https://vprc.ir/wp-content/uploads/docs/BS-ISO/BS%20ISO%2020816-1%202016.pdf>>. Acesso em Agosto de 2020.

COSTA, G. A. S. Análise vibratória de fundações de máquinas sobre estacas. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil- Faculdade de Engenharia, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 144p., 2013.



GEVINSKI, J. R. Determinação da Deformação Dinâmica em Superfícies Utilizando Parâmetros Vibracionais. Tese de Doutorado, Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas - SP, 258p., 2014.

MISHANI, M. B. B.M. Application of simplified operating deflection shape technique in machinery vibration assessment. Master of Engineering Science. Faculty of Engineering, University of Malaya, Kuala Lumpur, 122p., 2017.

OLIVEIRA, J. P. de. Estudo de vibrações em motores elétricos. Trabalho de conclusão de curso, Engenharia Mecânica, Centro Universitário do Sul de Minas – UNIS, Varginha, 43p., 2018.

PRICE, S.M. A comparison of operating deflection shape and motion amplification video techniques for vibration analysis. 48th Turbomachinery & 35th Pump Symposia. Houston, Texas/ September 9-12, 2019. George R. Brown Convention Center, 16p., 2019.

SARTORI, I. O. R. Análise Modal Experimental de um Sistema Dinâmico utilizando Medição da Forma de Deflexão Operacional. Trabalho de Conclusão de Curso, Engenharia Mecânica, Universidade Federal de São João del-Rei, Minas Gerais, 46p., 2014.

SILVA, J.N; MARQUES, A. C; MACHADO, E. C; SILVA, V. A. D. Estudo da influência de acoplamentos flexíveis no alinhamento de eixos utilizando a medição da forma de deflexão operacional (ODS). XVIII CONEMI – Congresso Nacional de Engenharia Mecânica e Industrial. Joinville, Santa Catarina, 18p., 2018.

SOUZA, P. H. M. Análise Modal Experimental Utilizando Vibrômetro Laser Doppler. Trabalho de Conclusão de Curso, Departamento do Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de São João Del Rei, São João del Rei – MG, 57p., 2014.

VIBRANT. Disponível em: <<https://www.vibetech.com/>>. Acesso em: 24 ago. 2020.