Brazilian Journal of Development

Análise estrutural de um chassi tubular através das técnicas de ODS e análise de vibração

Structural analysis of a tubular chassis through ODS techniques and vibration analysis

DOI:10.34117/bjdv5n6-130

Recebimento dos originais: 13/04/2019
Aceitação para publicação: 02/05/2019

Josué Natan Silva
Graduando em Engenharia Mecânica
Instituição: Universidade Federal de São João del-Rei (UFSJ)
Endereço: Praça Frei Orlando, 170 | Campus Santo Antônio | Departamento de Engenharia Mecânica | Centro, São João del-Rei - MG, Brasil
E-mail: josuenatan@ymail.com

Angélica Dias Rodrigues
Graduanda em Engenharia Mecânica
Instituição: Universidade Federal de São João del-Rei (UFSJ)
Endereço: Praça Frei Orlando, 170 | Campus Santo Antônio | Departamento de Engenharia Mecânica | Centro, São João del-Rei - MG, Brasil
E-mail: angelica.engmec@gmail.com

Thaís da Costa Dias
Mestranda em Engenharia Mecânica (UFSJ)
Instituição: Universidade Federal de São João del-Rei (UFSJ)
Endereço: Praça Frei Orlando, 170 | Campus Santo Antônio | Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica (PPMEC) | Centro, São João del-Rei - MG, Brasil
E-mail: thaisdias.engmec@hotmail.com

Jorge Nei Brito
Pós-Doutor e Doutor em Engenharia Mecânica pela Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP)
Instituição: Universidade Federal de São João del-Rei (UFSJ)
Endereço: Praça Frei Orlando, 170 | Campus Santo Antônio | Departamento de Engenharia Mecânica | Centro, São João del-Rei - MG, Brasil
E-mail: brito@ufsj.edu.br

RESUMO

O grande desenvolvimento industrial e a busca incessante de maior rentabilidade nos últimos anos têm criado a necessidade de aperfeiçoamentos nos processos produtivos e de manutenção. A manutenção, através de suas técnicas, é um importante fator por contribuir com o equilíbrio entre produtividade e disponibilidade em um ambiente fabril. A Análise de Vibração é considerada a técnica mais importante para o monitoramento de máquinas por ser um método não invasivo e conter mais informações. Através de medições do nível de vibração de uma estrutura é possível fazer uma análise da forma da deflexão operacional, comumente conhecida como Operating Deflection Shape (ODS), e assim identificar os modos operacionais de deslocamento da estrutura. Buscando acompanhar a tendência da

Brazilian Journal of Development

globalização de compartilhar ferramentas de áreas distintas e afins, este trabalho propôs analisar através destas duas técnicas a rigidez torcional de um chassi de um veículo de competição estilo Fórmula SAE (Society of Automotive Engineers). Através dessa pesquisa foi possível detectar a forma operacional de deformação da estrutura e, consequentemente, realizar uma análise que permitiu identificar problemas estruturais do veículo. Os resultados dessa pesquisa poderão beneficiar outros pesquisadores e profissionais da Área de Manutenção e, especialmente, os alunos do curso de Engenharia Mecânica.

Palavras-Chave: Análise de Vibração, Operating Deflection Shape, Chassi Fórmula SAE.

ABSTRACT

The great industrial development and the unstoppable search for high profitability in recent years have created the need for improvements in the production and maintenance processes. Maintenance, through its techniques, is an important factor contributing on the balance between productivity and availability in a manufacturing environment. Vibration Analysis is considered the most important technique for the monitoring of machines since it is a non-invasive method providing a large amount of information. By means of measurements of the vibration level of a structure it is possible to make an analysis of the Operating Deflection Shape (ODS) and thus identify the operational modes of structure displacement. Seeking to follow the globalization trend of sharing tools from different and similar areas, this work proposes the analysis through these two techniques the torsional rigidity of a Formula SAE (Society of Automotive Engineers) competition vehicle's chassis. Through this research it was possible to detect the operational form of deformation of the structure and, consequently, to carry out an analysis that allowed the identification of structural problems of the vehicle. The results of this research may benefit other researchers and professionals in the Maintenance Area, and especially Mechanical Engineering students.

Keywords: Vibration Analysis, Operating Deflection Shape, Formula SAE Chassis.

1 INTRODUÇÃO

O grande desenvolvimento industrial e a busca incessante de maior rentabilidade nos últimos anos têm criado a necessidade de aperfeiçoamentos nos processos produtivos e de manutenção. Neste aspecto, é indispensável que os órgãos responsáveis pela manutenção e produção das empresas busquem um perfeito equilíbrio entre maior produtividade e maior disponibilidade dos equipamentos associados a baixos custos. Com o intuito de colaborar com o equilíbrio entre produtividade e disponibilidade, a manutenção influencia a disponibilidade através das técnicas de manutenção corretiva, preventiva e preditiva. (GEVINSKI, 2014).

A manutenção preditiva, dentre todas as outras formas de manutenção, ao monitorar os equipamentos visando o diagnóstico precoce e o prognóstico de defeitos, é a que tem apresentado melhor custo benefício. O resultado de sua correta implantação significa menos intervenções na planta industrial, menores estoques e maior confiabilidade dos

equipamentos. A manutenção preditiva é a primeira grande quebra de paradigma da manutenção e sua implantação é fruto de políticas gerenciais voltadas à manutenção corretiva não planejada, o que tem trazido ganhos significativos para as empresas que a adotaram.

Existem diversas técnicas voltadas para o diagnóstico de falhas de equipamentos, mas, tratando-se de manutenção preditiva, a Análise de Vibração é considerada há muitos anos a técnica mais importante para o monitoramento de máquinas. Em comparação a outros parâmetros que podem ser medidos não invasoramente, a assinatura por vibração é o que contém mais informação.

Com o avanço da tecnologia, novas técnicas ou métodos de diagnóstico de falhas mecânicas têm surgido. Conhecer essas técnicas e métodos pode ser um grande diferencial nesse cenário de globalização. Gevinski (2014) afirma que, no que diz respeito às análises em condições operacionais, técnicas de análise da forma de deflexão operacional da estrutura, comumente conhecida como *OperatingDeflectionShape*(ODS) e a Análise Modal Operacional (AMO) têm sido aplicadas com sucesso no monitoramento de máquinas e equipamentos. Através da ODS é possível identificar os modos operacionais de deslocamento da estrutura.

A partir de resultados positivos em trabalhos atuais sobre técnicas de ODS e análise de vibração em máquinas rotativas, este projeto propôs analisar através destas duas técnicas a rigidez torcional de um chassi tubular de um veículo de competição estilo Fórmula SAE *(Society ofAutomotiveEngineers)*, na qual estudantes de várias áreas da engenharia devem projetar e construir um protótipo de corrida que é avaliado em provas estáticas e dinâmicas.

Os chassis modernos são estruturas extremamente complexas de serem analisadas, por isso a intenção é contribuir para uma nova forma de estudo deste componente. Além disso, os métodos que serão realizados podem ser feitos para chassis de qualquer categoria, proporcionando assim um melhor aproveitamento destas análises.

O chassi é o principal componente estrutural de um veículo. Sendo ele um grande responsável pela segurança, desempenho e conforto. Todas as imperfeições da pista são transmitidas do pneu para a suspensão e posteriormente para o chassi. Esses esforços são dinâmicos e variam a sua intensidade e direção com o tempo (BERNARDES, 2015).

Tanto nos automóveis de corrida como nos de rua, o chassi é um componente de suma importância para o desempenho e segurança. Para um bom desempenho, o chassi deve ser perfeitamente rígido, quando comparado à suspensão e mais leve possível. Quanto à

segurança, é ele que deve suportar todo impacto devido a colisões ou capotamentos (CANUT, 2014).

Se tratando de fontes geradoras de vibrações, o veículo automotor é um sistema extremamente complexo. Isso porque as vibrações emitidas pelo veículo resultam da contribuição de várias fontes que atuam de forma simultânea, transmitidas de suas origens. Estas vibrações dificultam, na maioria das vezes, uma análise individual das fontes, no sentido de se conhecer a contribuição de cada uma no resultado global (MONTEIRO, 2013).

Considerando a rigidez do chassi é possível submetê-lo a uma análise da Forma de Deflexão Operacional que, segundo Sartori (2014) 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 análise estrutural é fundamental para a identificação das frequências determinísticas, níveis de vibração aceitáveis e a forma operacional de deformação da estrutura, tornando possível realizar intervenções pontuais nos equipamentos ao invés de trabalhar com a hipótese de tentativa e erro (BRITO, 2016). Desta forma, é possível assegurar a dinâmica veicular projetada para o carro em específico, além de aumentar a disponibilidade e a confiabilidade das peças e suas respectivas estruturas.

Baseado nesta realidade e com o intuito de contribuir para o desenvolvimento científico na construção do protótipo Fórmula SAE, o Grupo de Estudo e Pesquisa do Laboratório de Sistemas Dinâmicos (Gep_LASID) se sentiu motivado a experimentar os estudos sobre análise estrutural através da técnica de ODS e Análise de Vibração em um outro equipamento que não seja uma máquina rotativa.

O objetivo deste trabalho foi analisar a estrutura do chassi tubular do protótipo Fórmula SAE UFSJ Modelo 2016/2017 usando as técnicas de Análise de Vibração e ODS. Os sinais de vibração foram coletados com o carro ligado sem aplicação de carga, estado comumente chamado de "Ponto Morto", através do equipamento *Micrologg GX-75*, tecnologia *SKF*, na oficina da equipe Fórmula SAE UFSJ. Posteriormente os dados foram exportados e analisados no *software* ME'scopeVES, ambas tecnologias pertencem ao LASID (Laboratório de Sistemas Dinâmicos da UFSJ).

Foi possível realizar uma análise de vibração pelo espectro Magnitude X Frequência e detectar a forma operacional de deformação da estrutura na faixa de frequências

promovidas pelo movimento vibracional do motor. Desta forma, foi possível compreender o comportamento dinâmico do chassi de teste e sugerir ações corretivas. Com este estudo serão beneficiados os pesquisadores que trabalham com detecção de defeitos incipientes em equipamentos rotativos, profissionais da Área de Manutenção, membros das Equipes Fórmula FSAE e alunos das disciplinas do curso de Engenharia Mecânica da UFSJ.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 ANÁLISE DE VIBRAÇÃO

A Análise de Vibração é o processo pelo qual as falhas em componentes móveis de um equipamento são descobertas pela taxa de variação das forças dinâmicas geradas, sem interromper o funcionamento do mesmo. É considerada uma das técnicas preditivas mais eficazes para monitoramento de máquinas e é a que apresenta melhor custo x benefício.

Esta técnica detecta tanto falhas de origem mecânica como de origem elétrica. Segundo Brito et al. (2001), para o caso de desbalanceamento, desalinhamento e folga mecânica, as frequências determinísticas são $(1 \times f_r), (2 \times f_r)$ e $(3 \times f_r)$, onde f_r representa a frequência de rotação do motor. Além disso, devido a diferença de amplitude de aproximadamente 2/3 em $1 \times f_r$ da posição vertical para a horizontal, tem-se o indicativo da presença de problema estrutural no conjunto.

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. Dentre as normas ISO, as mais utilizadas são a ISO 2.372 e a ISO 3.945, cujos parâmetros estão especificados na Tabela 1. Estes são os níveis globais de vibração a serem utilizados para os estudos de ODS.

Tabela 1. Normas internacionais is0 2372 e iso 3945.

	CLASSE I Até 15kW (20 CV)	**CLASSE II** 15 a 75 kW (20 - 100 CV)	**CLASSE III** Acima de 75 kW BASE RÍGIDA	**CLASSE IV** Acima de 75 kW BASE FLEXÍVEL
	VALOR RMS DA VELOCIDADE DE VIBRAÇÃO (mm/s)			
NORMAL	Até 0,71	Até 1,12	Até 1,8	Até 2,8
ALERTA	0,71 a 1,8	1,12 a 2,8	1,8 a 4,5	2,8 a 7,1

SÉRIO	1,8 a 4,5	2,8 a 7,1	4,5 a 11,2	7,1 a 18,0
EMERGÊNCIA	Acima de 4,5	Acima de 7,1	Acima de 11,2	Acima de 18,0

NORMAL: O equipamento encontra-se dentro de seus níveis normais de operação.

ALERTA: O equipamento encontra-se com o nível de vibração acima do nível normal de operação, poderá operar sem sofrer danos.

SÉRIO: O equipamento está com elevados níveis de vibração e poderá sofrer danos se operar nesta condição por um longo período.

Equipamento em estado crítico, com risco de falha imediata.

Fonte: BRITO (2016)

2.2 ODS (*OPERATING DEFLECTION SHAPE*)

Segundo 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 a análise teórica. E recebe este nome quando os parâmetros modais são identificados conhecendo-se a força de excitação e as técnicas empregadas.

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 de Análise Modal Operacional (AMO) (SOUZA, 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 são finalizadas 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 (GEVINSKI, 2014).

A análise da ODS é feita a partir da relação de movimento entre um ponto de referência e 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 como se parece o modo de vibração e, finalmente, se podem ser aplicadas ações corretivas para reduzir os níveis de vibração e ruídos (SARTORI, 2014).

Segundo Sartori (2014), a principal diferença entre a ODS e as formas modais é a presença de vibrações forçadas, pois a ODS apresenta ambos os tipos de vibração, enquanto as formas modais, AME e AMO, são apresentadas apenas pela vibração ressonante. Dentre as vibrações forçadas, têm-se as geradas por forças internas, desbalanceamentos, cargas externas e excitação do ambiente.

Para Brito (2016), o comportamento dinâmico de estruturas pode ser avaliado a partir dos parâmetros modais do sistema, 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 a avaliação do comportamento dinâmico das máquinas, equipamentos ou estruturas (BRITO, 2016). E para Gevinski (2014), as técnicas de ODS podem ser utilizadas.

A ODS é a maneira mais simples de ver como uma máquina ou estrutura se move durante sua operação, seja em uma frequência ou momento específico no tempo (*Vibrant Technology, Inc., 2016*). O estudo por ODS é um teste de vibração e procedimento de análise capaz de fornecer a forma de deformação em resposta às forças aplicadas à estrutura e, também, de produzir animações das características de deformação de um sistema mecânico vibratório.

Está análise é uma combinação de movimento forçado de dois ou mais pontos, que atua sobre a estrutura e as propriedades dinâmicas da mesma, fornecendo respostas precisas e informações suficientes para identificar e resolver problemas (HUGAR e VENKATESH, 2014).

Medições de ODS podem ajudar a responder às perguntas relacionadas à vibração e em relação às diferenças esperadas no projeto em questão devido à variação de como se apresenta o sistema mecânico, conforme apresentado a seguir.

- Qual a magnitude de movimentação do sistema?
- Onde está movendo mais?
- Qual o sentido deste movimento?
- O movimento é de um ponto relativo ao outro?
- O movimento se repete em situações diferentes?
- Quais são os modos de vibração dessa estrutura?
- Que ações corretivas podem reduzir essa vibração estrutural?

Brazilian Journal of Development

2.3 TESTES EXPERIMENTAIS

Os testes experimentais foram desenvolvidos no chassi do veículo Fórmula SAE-UFSJ 2016/2017, Figura 1, na própria oficina da equipe, localizada no Campus Santo Antônio da Universidade Federal de São João del-Rei (UFSJ).



FIGURA 1. Carro Fórmula SAE UFSJ modelo 2016/2017. Fonte: Autora (2017).

Os carros Fórmula SAE têm motores de combustão interna de quatro tempos e cilindrada máxima de 610 cm³. A construção dos veículos deve obedecer às normas do regulamento da competição, que exige das equipes, com até 20 integrantes, que se especializem nos variados sistemas que compõem um carro deste tipo, como motorização, freios, direção, suspensão, sistemas elétricos, chassi e segurança (CANUT, 2014).

O chassi 2016/2017 da equipe FSAE-UFSJ, Figura 2, foi construído a partir dos aços SAE 1010 (32,51 kg), 4130 (32,43 kg) e 4340 (32,43 kg). Para ter resultados mais fidedignos, os testes experimentais foram feitos depois que o chassi passou pelo teste de rigidez torcional por elementos finitos feito pela equipe e a montagem do carro estava completa. Assim o veículo estava pronto para ser submetido às coletas de vibrações.



FIGURA 2. Chassi tubular Fórmula SAE UFSJ modelo 2016/2017. Fonte: Autora (2017).

Na realização da coleta dos dados o carro foi mantido ligado sem aplicação de carga. Nesta situação o motor opera provocando uma frequência de excitação que varia de 2.800 rpm a 3.200 rpm. Para coletar os sinais de vibrações foi utilizado o equipamento industrial Microlog GX-75. Os sinais foram coletados com dois acelerômetros SKF CMSS2200, com sensibilidade de 100 mV/G, o primeiro permaneceu na referência e o segundo coletou os dados em determinados pontos de acordo com as direções de liberdade. Por fim, para fazer a análise detalhada do comportamento do sistema em cada situação, gerar a simulação da ODS e montar um banco de dados foi utilizado o software ME'scopeVES^{TM}.

3 METODOLOGIA

A metodologia para a análise do chassi tubular do carro consistiu na medição dos sinais de vibração com o motor em funcionamento sem aplicação de carga. Em seguida procederam-se as análises dos sinais coletados.

Para se obter a estrutura no s*oftware*ME'scopeVES^{TM} foi importado um desenho feito pela equipe Fórmula SAE no *software*SolidWorks, Figura 3. Inicialmente a estrutura no ME'scopeVES^{TM}, Figura 4, possuía mais de 30.000 pontos criados automaticamente pela diferença de tecnologia entre os softwares. Isto exigia computadores superpotentes para criar a simulação. Através da rota, *Draw - Points - Remove Duplicate Points*, foi possível reduzir

o número de pontos do desenho para 3.841 possibilitando assim a criação da simulação em computadores comuns.

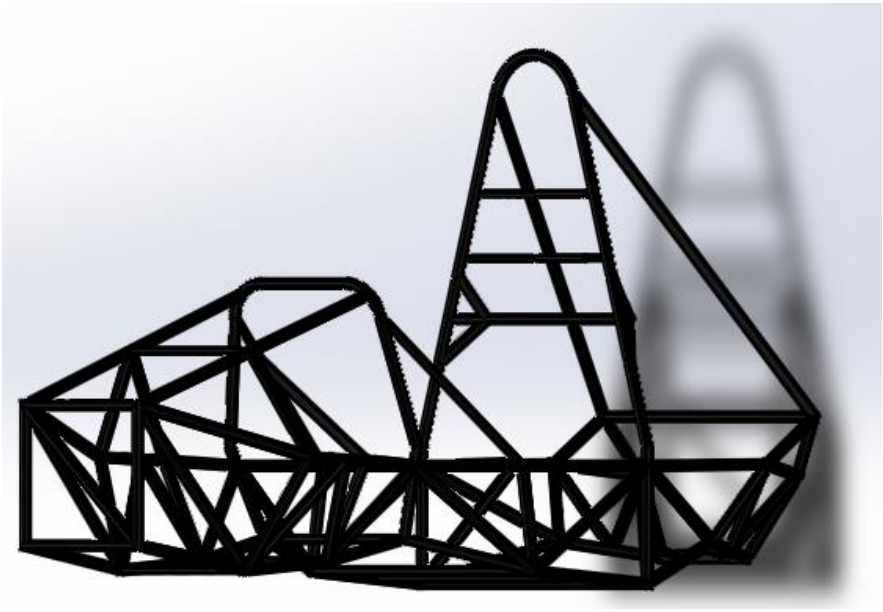


FIGURA 3. Estrutura desenvolvida no *software*SolidWorks. Fonte: Autora (2017).

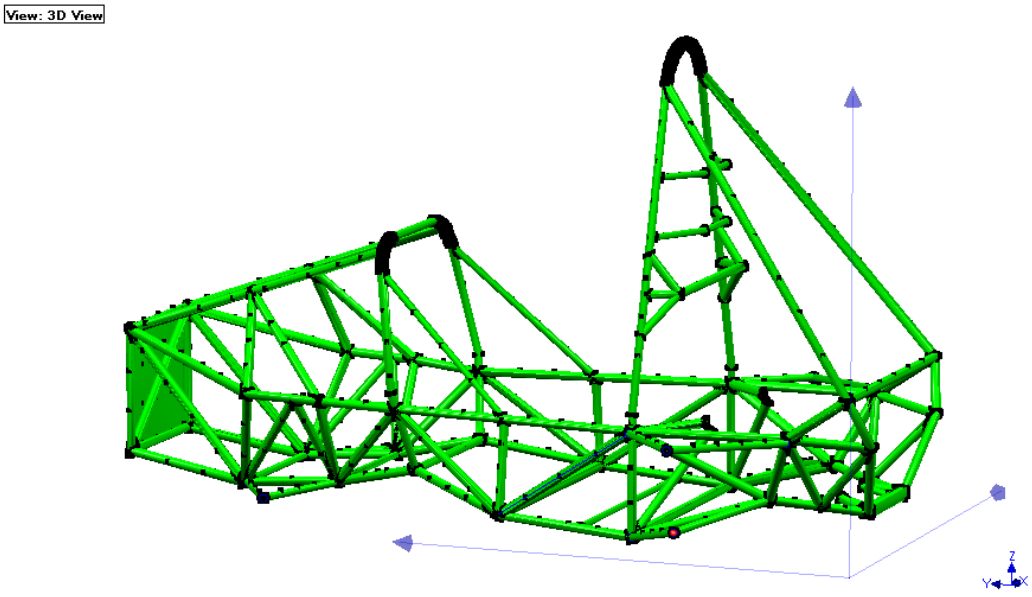


FIGURA 4. Estrutura importada para o software ME'scopeVES^{TM}. Fonte: Autor (2018).

A análise do sistema foi feita pela medição da malha que foi discretizada igualmente no sistema real e na estrutura desenvolvida no software para a análise. Para a estrutura em questão optou-se por coletar 248 pontos, Figura 5, sendo cada um com três direções de liberdade, **X**, **Y** e **Z**.

Brazilian Journal of Development

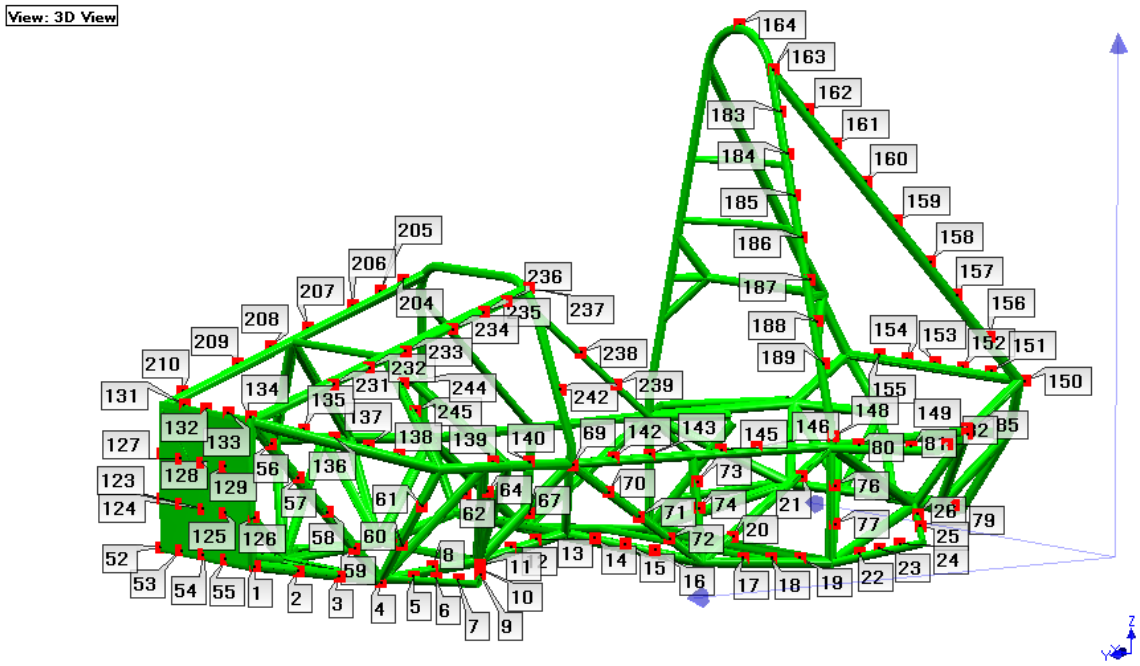


FIGURA 5. Vista panorâmica dos pontos coletados. Fonte: Autor (2018).

A função de interpolação do *software* foi utilizada naqueles pontos que possuíam alguma direção que a posição geométrica não permitia a coleta e em todos outros pontos que não foram selecionados.

4 ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

4.1 ANÁLISE DE VIBRAÇÃO

Após a coleta os dados foram importados para as Análises de Vibração e ODS no *software* ME'scopeVES™. 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 e seu primeiro harmônico.

Na Figura 6 pode-se observar o espectro da Função de Resposta em Frequência (FRF) de todos os pontos sobrepostos. Foi alcançada uma amplitude máxima de 2,5 mm/s na frequência de 50 Hz, média da faixa de frequências de excitação promovida pelo motor do veículo. E uma amplitude máxima de 3,82 mm/s no primeiro harmônico, frequência de 100 Hz. Segundo os dados da Tabela 1 estes valores indicam que o chassi nestas frequências se encontra com níveis de vibração acima do nível normal de operação, mas pode operar sem sofrer danos.

Brazilian Journal of Development

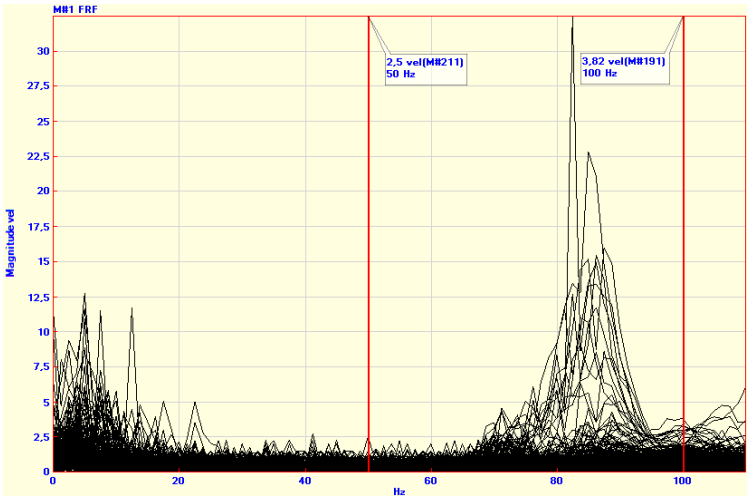


FIGURA 6. Espectro vibração Magnitude X Frequência| Pontos sobrepostos.Fonte: Autor (2018).

Entre as frequências de 79 Hz e 95 Hz o espectro de vibração do intervalo de pontos de 157 a 187 apresentou diversos picos, Figura 7. Chegando a uma amplitude extrema de 32,5 mm/s na frequência de 82,5 Hz sugerindo uma possível falha estrutural.

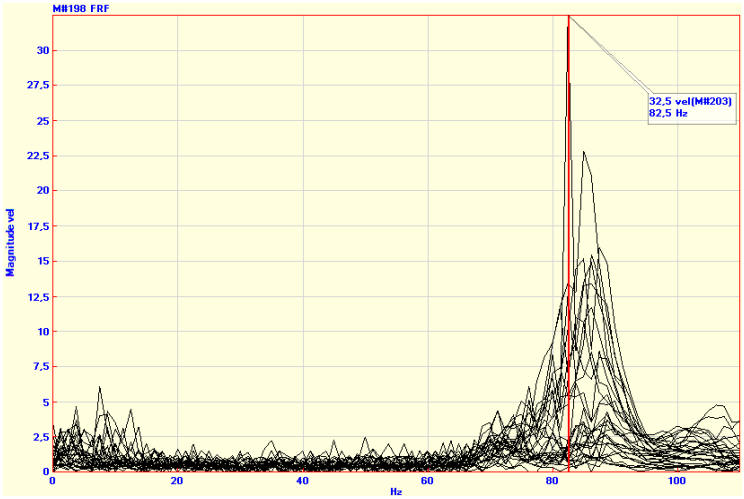


FIGURA 7. Espectro vibração Magnitude X Frequência | Pontos de 157 a 187. Fonte: Autor (2018).

Diante destes resultados, tornou-se interessante analisar os espectros de vibração neste intervalo de pontos separadamente a fim de identificar possíveis padrões. Embora a frequência de excitação promovida pelo motor não esteja contida nele esta análise é importante para auxiliar na interpretação dos resultados obtidos. Através das Figuras 8 e 9 foi possível comparar os espectros do ponto 157 nas direções x e y. Observa-se que na frequência de 86,2 Hz a amplitude de vibração alcançou 2,36 mm/s na direção x e 14,9 mm/s na direção y.

Brazilian Journal of Development



FIGURA 8. Espectro de vibração Magnitude X Frequência do ponto 157 na direção x. Fonte: Autor (2018).



FIGURA 9. Espectro de vibração Magnitude X Frequência do ponto 157 na direção y. Fonte: Autor (2018).

A mesma comparação para o ponto 159 pode ser realizada através das Figuras 10 e 11. Na frequência de 82,5 Hz a amplitude de vibração alcançou o valor de 1,28 mm/s na direção x e um valor extremo de 32,5 mm/s na direção y.



FIGURA 10. Espectro de vibração Magnitude X Frequência do ponto 159 na direção x. Fonte: Autor (2018).



FIGURA 11. Espectro de vibração Magnitude X Frequência do ponto 159 na direção y. Fonte: Autor (2018).

O ponto 185 repetiu o mesmo padrão. O seu espectro de vibração na frequência de 86,2 Hz apresentou uma amplitude de 0,523 mm/s na direção x, Figura 12, e de 11,7 mm/s na direção y, Figura 13.

Brazilian Journal of Development



FIGURA 12. Espectro de vibração Magnitude X
Frequência do ponto 185 na direção x.
Fonte: Autor (2018).



Figura 13. Espectro de vibração magnitude X
frequência do ponto 185 na direção y.
Fonte: Autor (2018).

Diante destes resultados foi observado que ao longo de todo este intervalo os pontos apresentaram as mesmas características. A partir da localização destes pontos na estrutura, Figuras 14 e 15, conclui-se que os níveis de vibração na direção y esta muito acima do que os níveis de vibração na direção x devido às características do chassi. Observa-se também a inexistência de componentes estruturais destinados a diminuir ou impedir a movimentação da estrutura nesta direção de maior excitação.

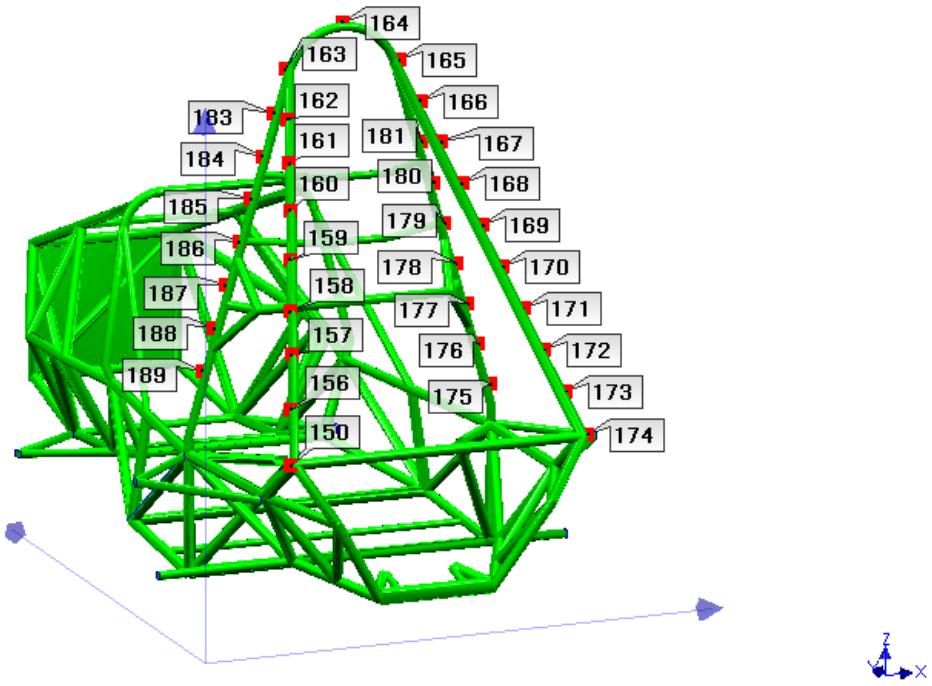


FIGURA 14. Vista panorâmica da localização do intervalo de pontos em destaque.
Fonte: Autor (2018).

Brazilian Journal of Development

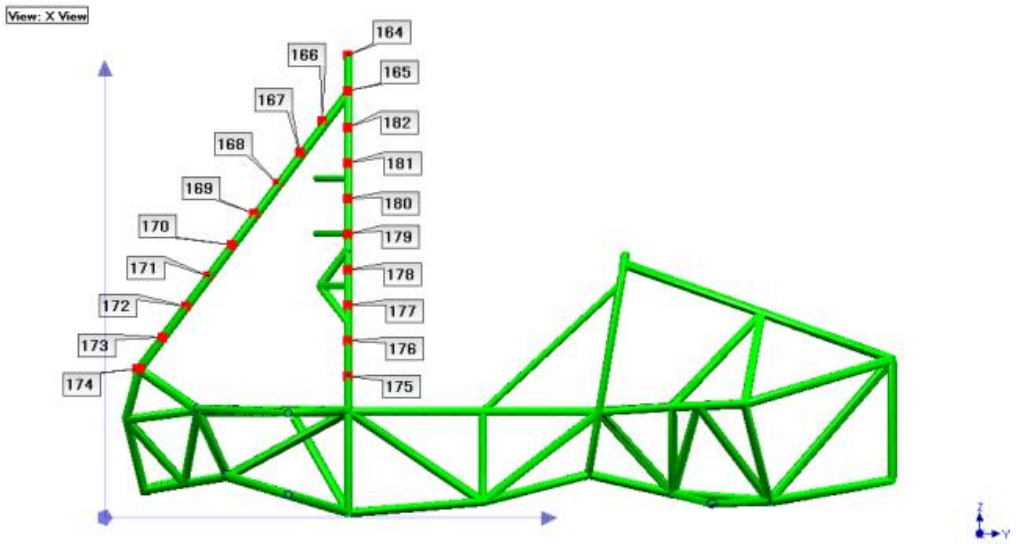


FIGURA 15. Vista lateral da localização do intervalo de pontos em destaque.

Fonte: Autor (2018).

4.2 OPERATING DEFLECTION SHAPE -ODS

O primeiro passo para realizar a ODS foi fazer a Análise de Vibração contida no subitem anterior. Após isto, foi possível obter o modelo computacional e seu respectivo comportamento relacionando as excitações sofridas na estrutura na frequência de 50 Hz, Figura 16. Observa-se que o nível de vibração máximo atingiu o valor de 2,54 mm/s na parte superior do chassi.

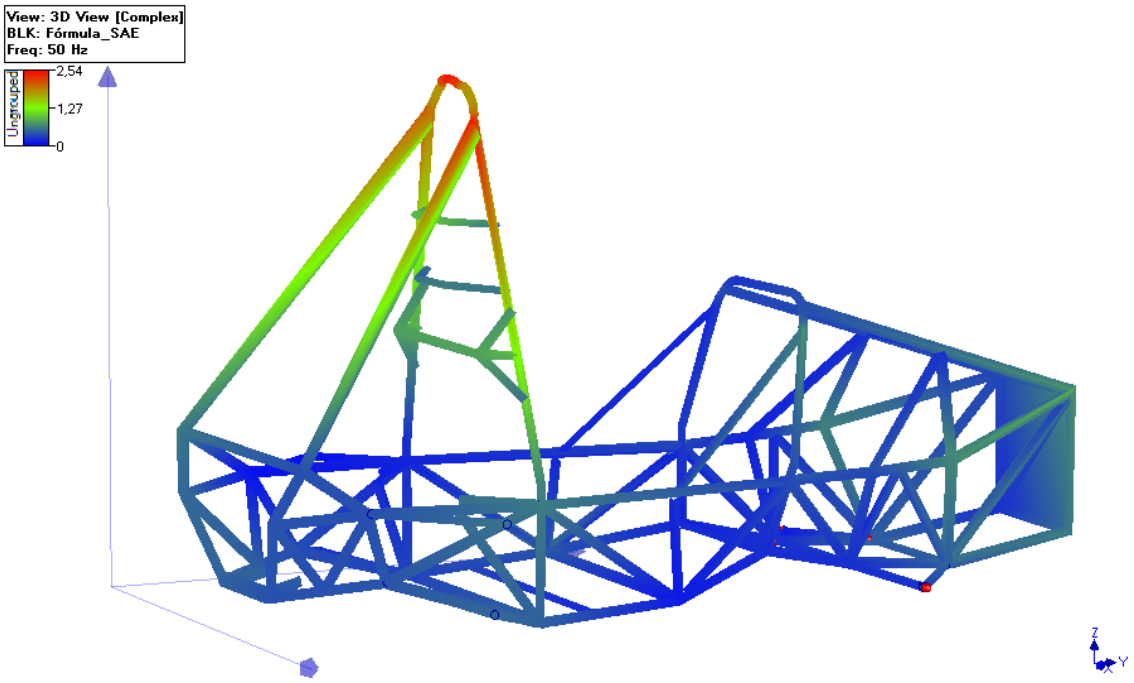


Figura 16. Simulação das excitações na estrutura. Fonte: Autor (2018).

Brazilian Journal of Development

Na Figura 17 tem-se o registro da movimentação da estrutura em relação a sua posição inicial, evidenciando a necessidade de adicionar componentes estruturais para impedir o deslocamento da parte traseira superior na direção y.

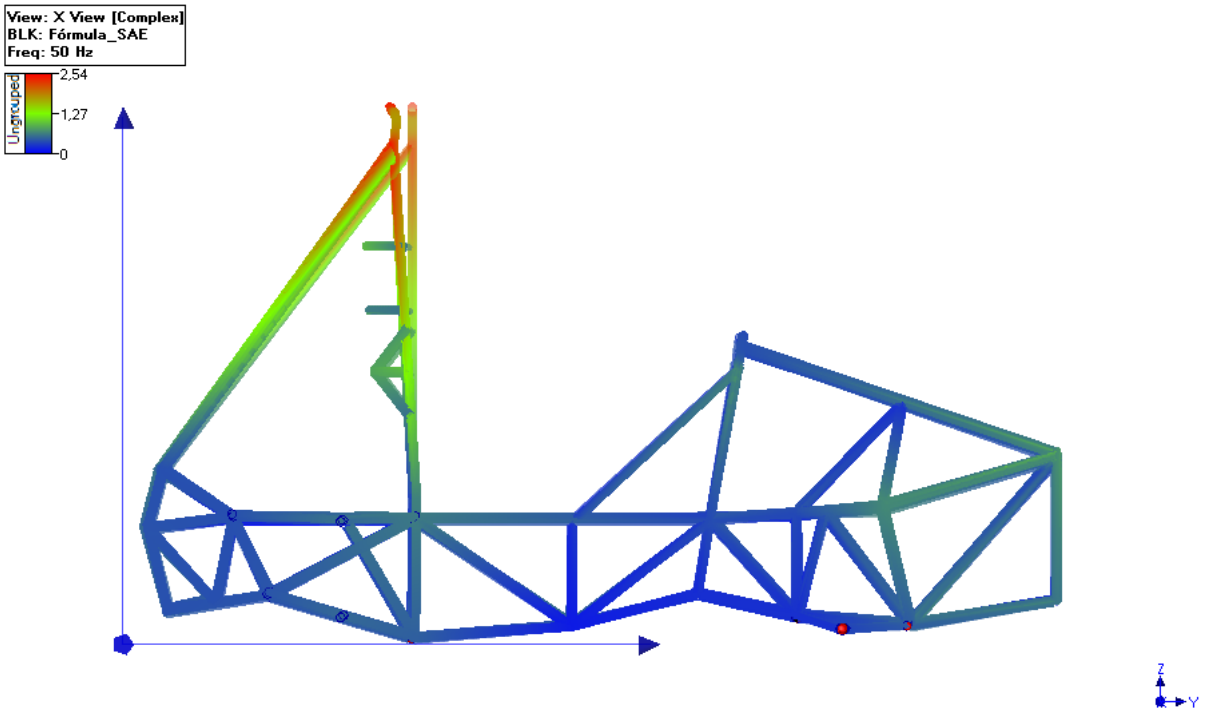


FIGURA 17. Movimentação da estrutura perante excitações sofridas. Fonte: Autor (2018).

Nota-se que as regiões que apresentaram maiores níveis de vibração não possuem grandes exigências mecânicas. Observa-se também que na frequência de rotação promovida pelo motor a vibração está em um nível acima do normal, mas que a estrutura pode operar sem sofrer danos. Como um dos objetivos da equipe Fórmula SAE é construir um veículo com o menor peso possível é preciso analisar se a adição de componentes estruturais a fim de impedir esta movimentação é algo de interesse.

Na Figura 18, pode-se observar o comportamento da estrutura quando os pontos que mais a excitaram são retirados. O nível máximo de vibração reduziu para 1,6 mm/s e não houve nenhuma parte da estrutura que tenha se destacado mais. Isto comprova que o nível que de vibração maior está sendo gerado pelos pontos que estão localizados na parte superior traseira do veículo.

Brazilian Journal of Development

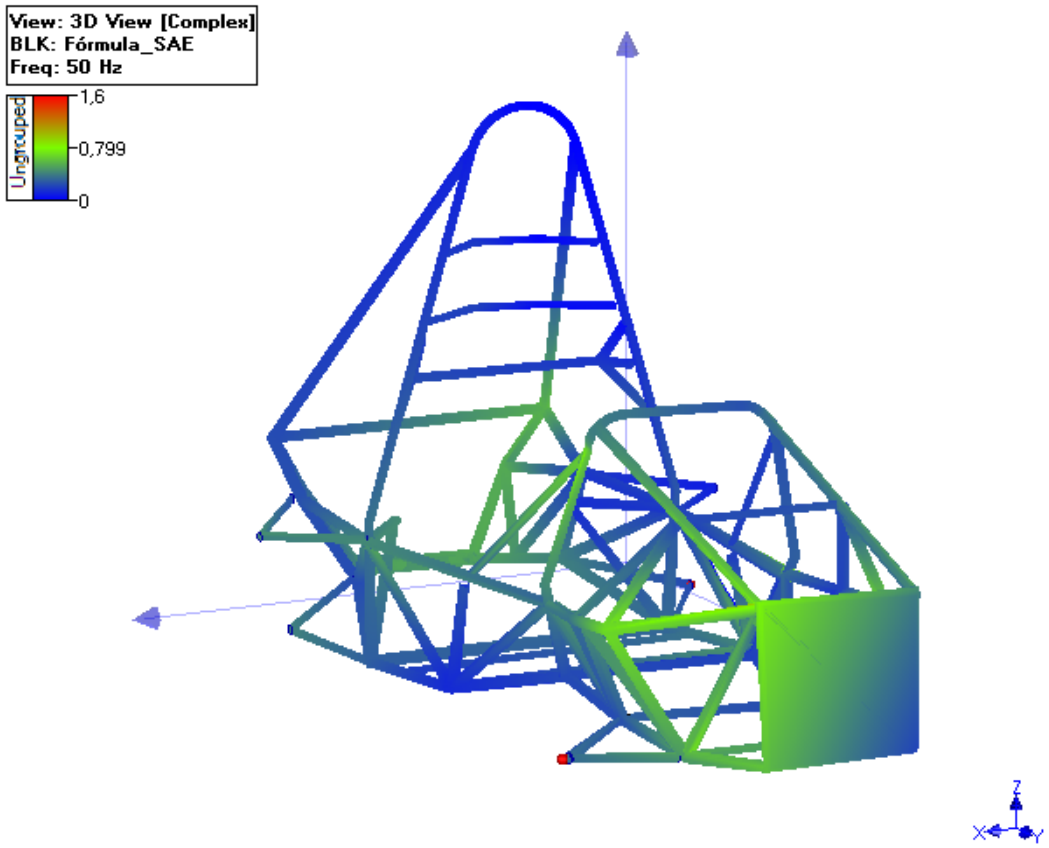


FIGURA 18. Simulação das excitações na estrutura sem o intervalo de pontos 157 a 187. Fonte: Autor (2018).

5 CONCLUSÃO

Os objetivos deste estudo foram alcançados de forma satisfatória, visto que foi possível analisar a estrutura tubular para veículos estilo Fórmula SAE através das técnicas preditivas de Análise de Vibração e ODS.

Os resultados encontrados comprovaram a grande importância da técnica preditiva de Análise de Vibração no auxílio da identificação de falhas estruturais no veículo. E a ODS permitiu de forma satisfatória conhecer o comportamento dinâmico do veículo através da simulação gerada no *software* Me'scopeVES^{TM}. Ela mostrou ser uma grande contribuição na análise estrutural deste modelo veicular. De uma forma particular, recomenda-se adicionar ao chassi os componentes que impeçam o deslocamento da parte superior traseira na direção que a estrutura apresentou maior movimentação.

Ao longo deste estudo os discentes do curso de Engenharia Mecânica tiveram a possibilidade de trabalhar com a coleta de sinais de vibração, a ODS e a Análise de Vibração, técnicas de grande utilização pelos profissionais de manutenção para solucionar problemas nas grandes empresas que geram altos custos se não forem corrigidos.

Para trabalho futuro sugere-se analisar se a redução no nível de vibração é vantajosa diante o aumento de massa do veículo. Sugere-se também analisar o efeito do nível encontrado de vibração na região em destaque do chassi para a coluna vertebral do condutor.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem em especial ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) por financiar este estudo contribuído para a formação de recursos humanos para a pesquisa e qualquer atividade profissional. Também agradecem aos coordenadores, membros e colaboradores do Grupo de Estudo e Pesquisa do Laboratório de Sistemas Dinâmicos e da Equipe Fórmula SAE da Universidade Federal de São João del-Rei que com tempo e disposição foram fundamentais para a execução deste trabalho.

REFERÊNCIAS

BERNARDES, P. H. O. Análise e otimização de um chassi Fórmula SAE. Trabalho de Conclusão de Curso – Curso de Engenharia Automotiva – Faculdade UnB Gama – Universidade de Brasília, p. 53, 2015.

BRITO, J. N.; ROBERTO, R.; PEDERIVA, R. Aplicação de Redes Neurais Artificiais para Detecção de Falhas em Motores Elétricos. *16th Brazilian Congresso f Mechanical Engineering (COBEM),* Uberlândia – MG, Brasil, 2001.

BRITO, L. C. Estudo de Rigidez de Base Através da Técnica de ODS e Análise de Vibração. Iniciação Científica – Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – Universidade Federal de São João Del Rei, p. 14, 2015.

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

HUGAR, N. L.; VENKATESH, P. R. *Shaker based Operating Deflection Shape (ODS) Testing of Two Wheeler Chassis, In International Journal of Advance Engineering and Research Development (IJAERD), v. 1, Issue 6, June 2014, e-ISSN: 2348 – 4470, print – ISSN: 2348-6406.*

MONTEIRO, L. F. Análise Comparativa da Energia Vibracional em Motor Diesel Utilizando Diesel e Biodiesel. Tese de Mestrado – Programa de Pós-Graduação em Engenharia da Energia – Universidade Federal de São João Del Rei e Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, 99 p., 2013.

SARTORI, I. O. Análise Modal Experimental de um Sistema Dinâmico Utilizando Medição da Forma de Deflexão Operacional. Trabalho de Conclusão de Curso – Departamento do Curso de Engenharia Mecânica – Universidade Federal de São João Del Rei, 44 p., 2014.

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, 57 p., 2014.

VIBRANT TECHNOLOGY INC., Me`scopeVes, Série Visual Engenharia. Estados Unidos da América.