Unisanta Science and Technology, 2022, 1, August
Published Online 2022 Vol.11 Nº1 http://periodicos.unisanta.br/index.php/sat)

UNISANTA
Science and Technology
ISSN 2317-1316

Utilização de análise de vibrações para monitoramento de parâmetros operacionais e detecção de falhas mecânicas em motores diesel de equipamentos móveis

Marcelo Moura[1], Willy Ank de Morais[1,2]

[1]**UNISANTA**– Universidade Santa Cecília – Pós-Graduação *latu sensu* em Engenharia da Confiabilidade
Rua Oswaldo Cruz, 266 - Santos-SP, Brasil - CEP: 11045-100

[2]**WILLY ANK - Soluções**
Rua Onze de Junho, 316 A.102 - Itararé, São Vicente-SP, Brasil, CEP: 11320-160

E-mail*:* marcelo.ufsj@gmail.com
Received July, 2022

Resumo: Motores são os componentes de maior valor em caminhões fora de estrada, representando, em média, 40% de todo o custo de materiais. Devido a isso, grande parte das atividades de manutenção focam em preservar suas funções e evitar falhas mecânicas. Nesse tipo de equipamento móvel, técnicas de análise de óleo e termografia são bastante difundidas, contudo, diferentemente do que acontece com ativos estacionários, a análise de vibrações ainda não tem muito espaço nas empresas. Esse trabalho tem por objetivo ilustrar alguns estudos que obtiveram sucesso com o uso da análise de vibrações para o monitoramento de parâmetros operacionais e como os mesmos têm potencial para questões relacionadas a fadiga e desalinhamento, contribuindo para redução de custos com falhas.

Palavras chave: Análise de Vibração; Motores de Caminhão; Análise de Falhas.

Use of vibration analysis to monitor operational parameters and detect mechanical failures in diesel engines of mobile equipment

Abstract: Engines are the highest-value components in off-highway trucks, representing, on average, 40% of all material costs. Due to this, most maintenance activities focus on preserving their functions and avoiding mechanical failures. In this type of mobile equipment, oil analysis and thermography techniques are pretty widespread; however, unlike what happens with stationary assets, vibration analysis still does not have much space in companies. This work aims to show some studies that have been successful in using vibration analysis to monitor operational parameters and how they have the potential to address issues related to fatigue and misalignment, contributing to reducing failure costs..

Keywords: Vibration Analysis; Truck Engines; Failure Analysis.

1. Introdução

Conforme a ISO 55000 [1], o controle eficaz e a governança dos ativos pelas organizações, são essenciais para obter valor por meio do gerenciamento de riscos e oportunidades, a fim de atingir o equilíbrio desejado entre custo, risco e desempenho.

A relação entre custo de manutenção e o tempo até a falha pode ser vista na Figura 1. Uma manutenção realizada cedo demais, desperdiça recursos e traz gastos desnecessários na vida de um ativo. Já uma manutenção tardia, com uma falha catastrófica, também gera um alto custo e grandes tempos de parada. Logo, saber a hora ideal de intervir é essencial para se reduzir custos e

Copyright © 2022 ISESC.

riscos. Isso pode ser conseguido através da manutenção baseada em condição.



Figura 1. Relação típica entre custo de manutenção e tempo para a falha, adaptado de [2].

A manutenção baseada em condição pode ser definida como uma estratégia de tomada de decisão que faz uso de técnicas de monitoramento com o intuito de possibilitar a detecção precoce de falhas e a diminuição do tempo de inatividade, bem como a redução dos custos operacionais. Logo, vê-se a importância do processo dentro da gestão de ativos.

No contexto de equipamentos móveis de mineração, a manutenção baseada em condição é bastante difundida com a utilização de técnicas de análise de óleo e termografia, contudo, diferentemente do que acontece com ativos estacionários, a análise de vibrações ainda não tem muito espaço nas empresas.

Sabendo que o motor é o componente de maior custo em um equipamento móvel, esse artigo tem como objetivo mostrar possíveis aplicações da técnica de análise de vibrações em motores e como ela pode se mostrar tão viável quanto as demais técnicas preditivas no monitoramento e na identificação de falhas mecânicas ao longo da vida dos ativos.

2. Falhas em Motores de Combustão

Segundo Aqueveque et al. [2], o estado da arte em monitoramento de condições de equipamentos pesados móveis pode ser dividido em dois grupos: o monitoramento *on board* realizado pelo Fabricante (*OEM*, *on board monitoring*) e as demais técnicas preditivas utilizadas pelos usuários.

Dentro do monitoramento realizado pelo *OEM* estão os Módulos de Controle do Motor (*ECMs*, *Engine Control Modules*). Esses sistemas controlam taxa de ar-combustível, sincronização de válvulas, entre outras funções, porém, tem um alcance limitado pelos sensores e atuadores pré-instalados.

Os *ECMs* recebem e interpretam sinais dos sensores gerando, quando aplicável, um alerta de falha, marcado com um código. Normalmente essas informações são associadas a resultados provenientes de análises de óleo e termografias para identificação e tratamento da origem de problemas para uma cobertura mais ampla.

Um alto nível de controle e análise de dados é necessário uma vez que o motor diesel, por ser uma máquina de alta complexidade composta de vários subsistemas, está suscetível a uma série de modos de falha.

Conforme mostrado na Figura 2, apresentada por Allam et al. [3], os itens que mais apresentam falhas estão contidos no sistema de injeção (43%), cabeçote e válvulas (19%) e sistema de lubrificação (15%) são os que mais apresentam falhas.

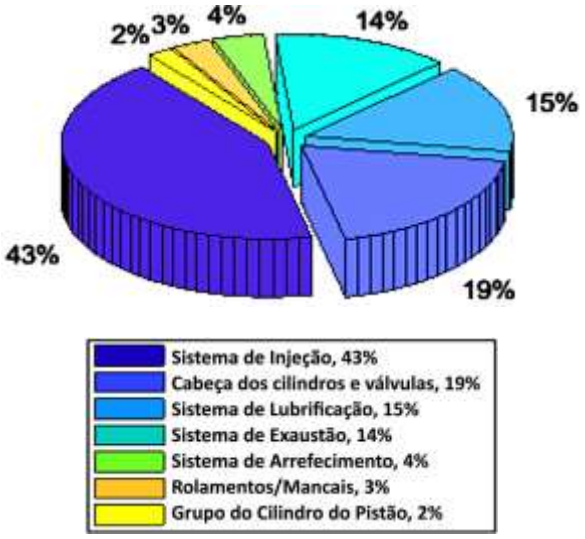


Figura 2. Distribuição das falhas em motores diesel, adaptado de [3].

Tais falhas podem não apenas causar a parada total do equipamento, mas também comprometer a performance do motor enquanto trabalha. O sistema de injeção, por exemplo, determina o torque do motor, as emissões, o ruído e consumo específico de combustível, logo, uma falha no mesmo tem muitas implicações e precisa ser detectada no seu início.

No caso da análise de vibrações, a detecção de falhas nos estágios iniciais, juntamente com o diagnóstico e previsão de quebras, torna-se possível com o uso de instrumentos capazes de separar as frequências presentes no sinal de vibração.

De acordo com Espinosa [4], em equipamentos em geral, existem diversas fontes de vibração, com amplitudes e frequências distintas. O sinal resultante é um onde "deformada", fruto da "soma" de cada componente, conforme demonstrado na Figura 3, na qual onde "S" é a soma das ondas 1 e 4.

Copyright © 2022 ISESC

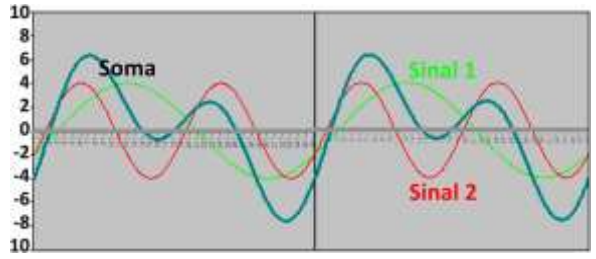


Figura 3. Exemplo de soma de ondas, adaptado de [4].

Marçal [5] faz menção que é possível correlacionar cada componente de frequência, com o comportamento dinâmico dos elementos de máquina. A capacidade de separação de frequências dependerá da largura do filtro utilizado pelo instrumento. Quanto mais estreita for à largura do filtro, mais fácil será a separação de frequências muito próximas e consequentemente mais fácil será a detecção de falhas.

Não apenas os aumentos de níveis em componentes de frequência fornecem indicação de falhas, mas também a frequência em que elas ocorrem indica qual parte da máquina está se deteriorando.

Cada ponto de monitoramento terá suas frequências características que podem ser reveladas com o auxílio da análise de frequência. O registro do aumento dos níveis para um ou mais componentes de frequência, sobre um número de medidas periódicas, possibilita a monitoração da tendência dos níveis dessas componentes em função do tempo para as falhas em desenvolvimento.

O uso de sinais de vibração em aplicações com motores de combustão interna se mostra bastante difícil devido à complexidade dos sinais de vibração e a grande quantidade de dados envolvida na análise.

Autar [6] menciona que, desde que se iniciou o uso de análise de vibrações em máquinas no mundo, percebeu-se que qualquer abordagem eficaz dedicada aos motores de combustão interna teria que lidar com a natureza altamente transitória de suas vibrações.

Devido a isso, conforme dito por Klinchaeam [7], os métodos de análise de vibração de um motor devem envolver a determinação da presença e da ausência de eventos esperados, que ocorrem em amplitudes mensuráveis e em um tempo específico. Usando o conhecimento do motor, as regiões do padrão de vibração podem ser separadas e anomalias podem ser detectadas por comparação com um padrão de condição normal de base.

Dentre os métodos propostos, Allam et al. [3] testaram o cruzamento de informações de um sensor de vibração, com intervalo de frequência de 0,5 Hz a 3 kHz, com um sensor de proximidade para medição do ângulo do virabrequim (um pulso por revolução).

No domínio angular, a análise pôde correlacionar claramente os eventos de vibração ao funcionamento do sistema de injeção. Os eventos de injeção para cada cilindro ocorrem em ângulos de cerca de 180˚, 360˚, 540˚ e 720˚, consistente com a ordem de disparo prevista.

3. Metodologia

No experimento de Allam et al. [3], foram inseridas 3 falhas distintas no motor, sendo elas:

- redução da pressão de Injeção
- aumento na quantidade de combustível despendida
- alteração da temporização da injeção de combustível

A Figura 4 mostra o sinal de vibração quando a pressão de injeção do injetor nº 1 foi reduzida a zero. O sinal de vibração correspondente à condição normal é mostrado na cor azul e o sinal com o item defeituoso é apresentado na cor vermelha.

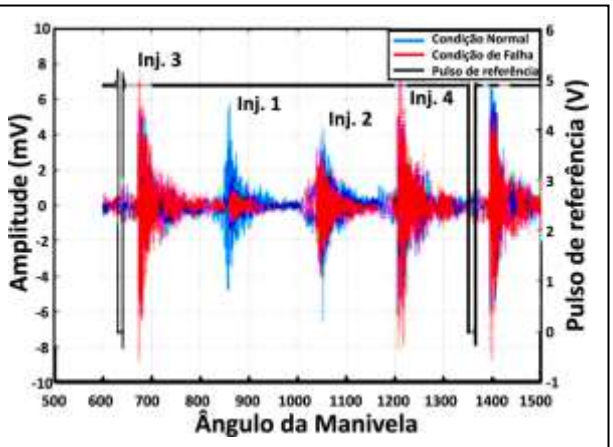


Figura 4. Sinal de vibração no domínio angular com falha no injetor 1, adaptado de [3].

Os sinais de vibração transitória ocorrem quatro vezes por ciclo (conforme o ciclo do motor diesel), que são essencialmente causados pelas unidades de injeção e pelos injetores. Quando a pressão de injeção foi reduzida para zero para o injetor 1, o combustível não foi injetado, daí o transiente do sinal de vibração relacionado ao injetor 1 tornou-se mais fraco do que a condição saudável.

A análise no domínio da frequência fornece informações espectrais dos sinais de vibração. Transformando-os do domínio angular para o domínio da frequência, as características comuns no espectro de sinais de vibração são a frequência de injeção e seus

Copyright © 2020 ISESC

harmônicos. A Figura 5 mostra a amplitude da resposta de vibração em relação à frequência.

Os sinais de vibração no domínio da frequência foram obtidos por Allam [2] através do uso da Transformada Rápida de Fourier. A Figura 5, novamente, mostra o espectro da condição saudável em azul, bem como o espectro da condição defeituosa em vermelho. Uma mudança clara pode ser observada nos espectros quando a pressão de injeção foi reduzida.

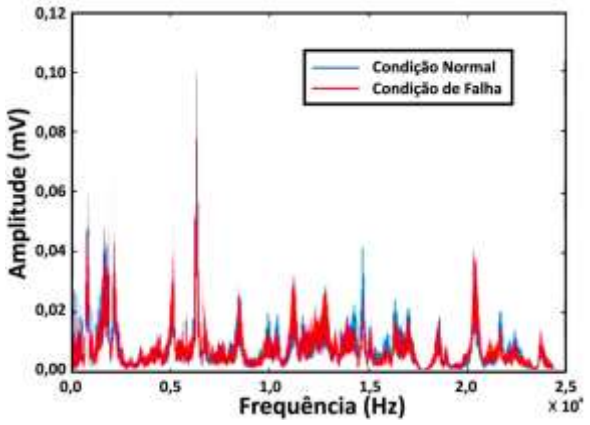


Figura 5. Espectro de Frequência do sinal de vibração com falha no injetor 1, adaptado de [3].

Em relação ao aumento na quantidade de combustível despendida e da alteração da temporização da injeção de combustível, também foi possível identificar as falhas. Nesses casos, o transiente do sinal de vibração relacionado ao injetor "com falha" perdeu a sincronia com relação ao de condição saudável, conforme ilustra o gráfico da Figura 6.

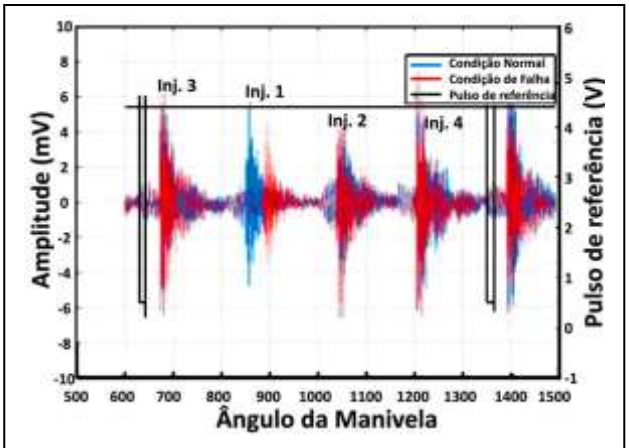


Figura 6. Sinal de vibração no domínio angular com o injetor 1 apresentando aumento na quantidade de combustível despendida 1, adaptado de [3].

Usando metodologia similar, Klinchaeam e Nivesrangsan [7] conseguiram detectar falhas relacionadas a folga em válvulas de admissão e escape de um moto. Os autores empregaram o sinal de vibração e o sinal de proximidade para medir o ângulo do virabrequim, conforme esquematizado na Figura 7.

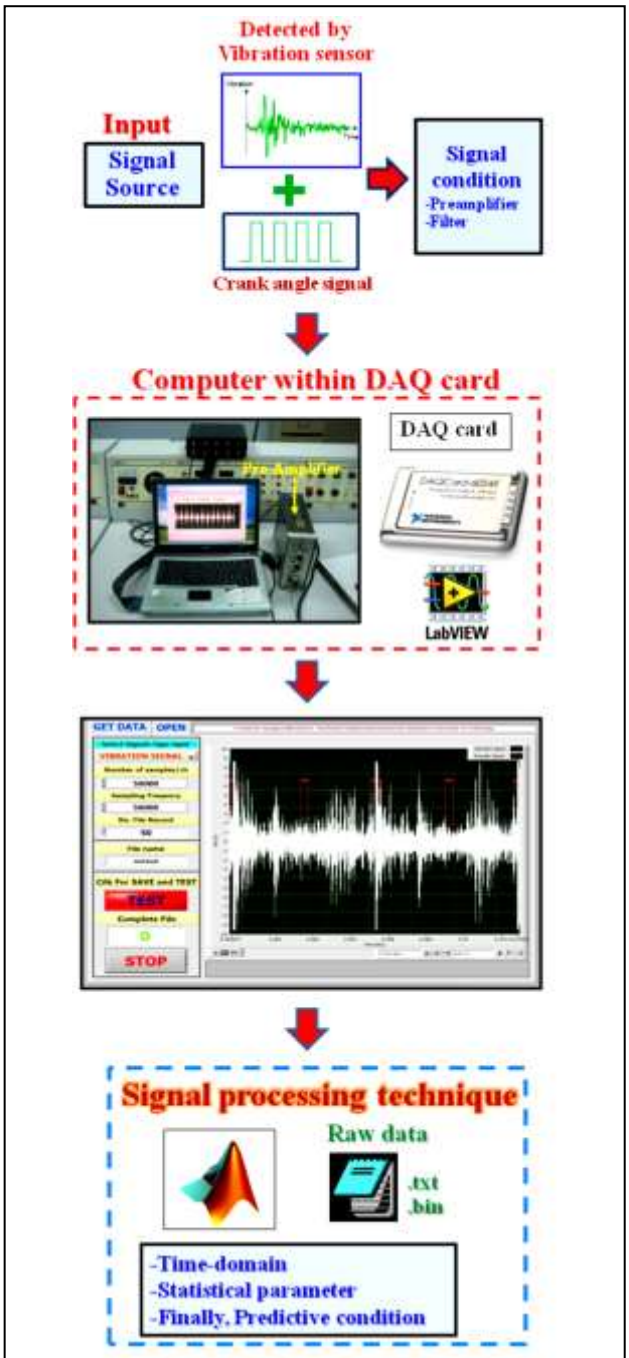


Figura 7. Diagrama esquemático do sistema de aquisição de dados utilizado por Klinchaeam e Nivesrangsan [7].

Copyright © 2022 ISESC
Unisanta Science and Technology **(25-30) p.p. ISSN 2317-1316**

4. Resultados e Discussão

A quantidade de combustível, tempo de injeção, pressão de injeção e a folga de válvulas são parâmetros chave dentro do processo de um motor diesel e devem ser mantidos em seus valores ideais para diminuir o consumo de combustível, controlar as emissões de poluentes e aumentar a potência (pontos fundamentais dentro do contexto de gestão de ativos e desejáveis dentro de qualquer organização).

Isso, por si só, já serviria como justificativa para um maior desenvolvimento e aplicação de técnicas de análise de vibração em motores de equipamentos móveis (em conjunto com demais técnicas de monitoramento das condições comumente utilizadas hoje), principalmente com os artigos citados anteriormente mostrando a viabilidade de tais técnicas em alguns cenários.

Contudo, há ainda outros benefícios potenciais da aplicação de análise de vibrações em motores e estes estão ligados com a detecção de falhas mecânicas. Em aplicações estacionarias, a análise de vibrações já consegue detectar falhas relacionadas a desalinhamento e fadiga. Caso isso seja transposto para motores, os ganhos de confiabilidade seriam significativos.

Um motor é composto por uma série de válvulas de admissão e escape, as quais operam sob cargas cíclicas durante toda a vida da máquina. Devido a isso, tais válvulas estão sujeitas a falhas por fadiga. Uma adaptação do trabalho de Klinchaeam e Nivesrangsan [7], mencionado anteriormente, caso testado, teria o potencial de detectar esse tipo de problema e possibilitar seu devido tratamento antes de uma falha catastrófica.

Para demonstrar essa aplicação, na Figura 8, uma válvula completa é colocada ao lado de uma válvula quebrada para comparação. As setas verdes indicam o local de quebra da válvula com falha e a seta azul mostra o local onde a cabeça da válvula é soldada à haste da válvula.

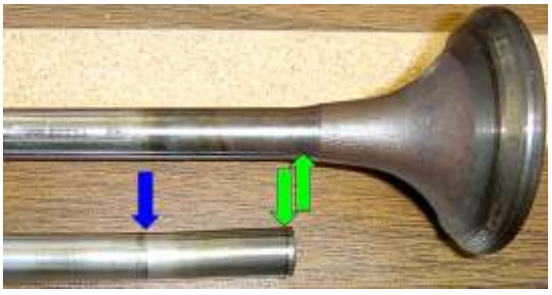


Figura 8. Comparação entre uma válvula completa e uma quebrada. As setas verdes indicam o local de quebra e a seta azul mostra o local onde a cabeça da válvula é soldada à haste da válvula [8].

Segundo a página Highway and Heavy Parts [8], se a válvula não tinha falhas na área de quebra e não fraturou na solda, é mais provável que a causa da falha seja a fadiga de flexão por desalinhamento da mesma. O aspecto da fratura, mostrado na Figura 9, corrobora com a observação [8], uma vez que a mesma demonstra a presença de "marcas de praia" (marcas com aparência de ondas que ocorrem devido à alteração de variáveis do ciclo de tensões), bem como "marcas de catraca" (que são degraus que separam trincas de fadiga vizinhas que estão se propagando ao mesmo tempo).



Figura 9. Face da fratura de fadiga de flexão por desalinhamento de uma válvula [8].

Uma válvula desalinhada invariavelmente demonstraria folgas fora do padrão, bem como variações na combustão dentro da câmara (com os ciclos de admissão ou de escape alterados), logo, técnicas de análise de vibração poderiam ser testadas nesse tipo de cenário e, posteriormente, aplicadas em rotinas de manutenção.

Montagens incorretas dos componentes do motor, problemas de fabricação ou a instalação incorreta do mesmo no equipamento, também podem gerar vibração elevada durante velocidades específicas, que podem culminar em falhas como a ilustrada na Figura 7. Conforme a *Brabon Engineering Services* [9], em geral, vibrações de torção elevadas não exibem indicações externas, a menos que ocorram danos. Logo, isso torna esse tipo de falha outro potencial campo de aplicação da análise de vibrações.

Futuros trabalhos poderiam, através de um FMEA detalhado do motor, listar falhas com potencial de detecção através de análise de vibrações e,

Copyright © 2020 ISESC

posteriormente, realizar experimentos práticos em bancadas de teste para confirmação da aplicabilidade.



Figura 10. Fratura por fadiga do virabrequim resultado de forjamento/imperfeição metalúrgica [9].

5. Conclusões

Todas as máquinas com partes móveis emitem vibração. Cada máquina possui uma assinatura de vibração específica relacionada à construção e o estado da máquina. Se o estado da máquina mudar, a assinatura de vibração também mudará. Devido a isso, uma mudança na assinatura de vibração pode ser usada para detectar falhas iniciais antes que elas se tornem críticas.

No caso de motores de equipamentos móveis, a aplicação de tais técnicas de monitoramento de condições por vibração ainda é limitada dentro de empresas, porém, a literatura já demonstra que avanços vêm sendo feitos nos últimos anos, detectando condições anormais de operação dos componentes.

Os trabalhos relacionados a análise de vibração em motores que obtiveram sucesso envolvem a determinação da presença ou da ausência de eventos esperados, detectando anomalias por comparação com um padrão de condição normal de base.

Com isso, há potencial na utilização dessas técnicas também para detecção de falhas mecânicas relacionadas a fadiga e desalinhamento.

O maior conhecimento sobre o equipamento, bem como a maior previsibilidade de falhas, invariavelmente acarretará redução de custo, menores riscos operacionais e um potencial maior de geração de valor, colocando todo o processo em linha com a gestão de ativos.

Referências

1 ABNT NBR ISO 55000:2014. **Gestão de ativos — Visão geral, princípios e terminologia**. ABNT/CEE-251 Gestão de Ativos. Confirmada em 02/12/2016. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2014.

2 AQUEVEQUE, P.; RADRIGAN, L.; PASTENE, F.; MORALES, A. S.; GUERRA, E. Data-Driven Condition Monitoring of Mining Mobile Machinery in Non-Stationary Operations Using Wireless Accelerometer Sensor Modules. **IEEE Access**, V. 9 (1): 17365-17381, 2021. DOI: https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3051583.

3 ALLAM, S.; ABDO, M.; RABIE, M. Diesel Engine Fault Detection Using Vibration and Acoustic Emission Signals**. International Journal of Advances in Scientific Research and Engineering (IJASRE)**. V. 4 (12): 86-93, 2018. DOI: https://doi.org/10.31695/IJASRE.2018.33005.

4 ESPINOSA, 2022. [Online] Disponível na internet via WWW URL: https://xdocs.com.br/doc/apos-vi-brevis-ada-qxn410rz5pnj. Acessado em 11 de Julho de 2022.

5 MARÇAL, R. **Medição, análise e controle de vibração em máquinas industriais: Estudo de caso em uma empresa de grande porte do setor madeireiro**. Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Ponta Grossa, Brasil, 2013, 68p.

6 AUTAR, R. An automated diagnostic expert system for diesel engines. ASME: **Journal of Engineering for Gas Turbines and Power**. V. 118 (3): 673-679. DOI: https://doi.org/10.1115/1.2816701.

7 KLINCHAEAM, S.; NIVESRANGSAN, P. Condition monitoring of valve clearance fault on a small four strokes petrol engine using vibration signals. **Songklanakarin J. Sci. Technol**. V. 32 (6): 619-625, 2010.

8 HAHP - Highway and Heavy Parts, 2022. [Online] Disponível na internet via WWW URL: https://highwayandheavyparts.com/n-12624-valves-failure-analysis.html. Acessado em 15 de Agosto de 2022.

9 BRABON ENGINEERING SERVICES. **Diesel engine failure**. 2022. [Online] Disponível na internet via WWW URL: https://brabon.org/tech-notes/diesel-engine-failure. Acessado em 15 de Agosto de 2022.

Copyright © 2022 ISESC