

## **ESTUDO DA CORRELAÇÃO DAS DIFERENTES TÉCNICAS DE MONITORAMENTO (VIBRAÇÃO, TEMPERATURA E CORRENTE ELÉTRICA) PARA DETECÇÃO DE DESBALANCEAMENTOS DE ROTORES**

CLARICE PEDROSA SANTANA<sup>1\*</sup>; HYGOR SANTIAGO LARA<sup>2</sup>;  
JORGE NEI BRITO<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Discente em Engenharia Mecânica, UFSJ, São João del-Rei – MG, claricepedsantana@gmail.com;

<sup>2</sup>Discente em Engenharia Mecânica, UFSJ, São João del-Rei – MG, hsantiagolara@gmail.com;

<sup>3</sup>Dr. em Engenharia Mecânica, DEMEC, UFSJ, São João del-Rei – MG, brito@ufs.br

Apresentado no  
Congresso Técnico Científico da Engenharia e da Agronomia – CONTECC'2018  
21 a 24 de agosto de 2018 – Maceió-AL, Brasil

**RESUMO:** Neste estudo foram feitas correlações dos parâmetros de vibração, temperatura e corrente elétrica para detecção de desbalanceamento dinâmico de rotores. As forças geradas no desbalanceamento produzem forças dinâmicas que reduzem o tempo de utilidade dos equipamentos rotativos ocasionando a elevação do "Custo da Manutenção", a redução do "Tempo Médio Entre Falhas (TMEF)" e o aumento da indisponibilidade do ativo. Os testes foram realizados em uma bancada didática composta por um motor de dois polos e um rotor. Inseriu-se diversos níveis de desbalanceamento através de quatro massas (1,0; 1,8; 3,0 e 5,2 g), visando observar o comportamento dinâmico do conjunto e a eficiência de detecção do desbalanceamento dinâmico através dos parâmetros citados. Com os dados coletados foi possível correlacionar os efeitos do desbalanceamento dinâmico, confirmando o padrão linear entre temperatura/vibração e corrente elétrica/vibração. Concluiu-se que através da inserção da falha controlada pode-se delimitar as faixas de desbalanceamento, considerando-se os seguintes níveis: Good, Satisfactory, Unsatisfactory e Unacceptable. Fez-se uma correlação dos níveis globais de vibração para temperatura e corrente elétrica, especificamente para o desbalanceamento dinâmico em estudo. Dessa forma é possível, com instrumentos simples (Caneta de Vibração, Sensor de Temperatura e Alicates Amperímetro) correlacionar diferentes técnicas de monitoramento e identificar a alteração do comportamento dinâmico do ativo na fase inicial, permitindo uma ação corretiva planejada.

**PALAVRAS-CHAVE:** Desbalanceamento, Vibração, Temperatura, Corrente Elétrica.

### **CORRELATION STUDY BETWEEN DIFFERENT MONITORING TECHNIQUES (VIBRATION, TEMPERATURE AND ELECTRICAL CURRENT) FOR DETECTION OF UNBALANCED ROTORS**

**ABSTRACT:** In this study the correlation between vibration, temperature and electrical current for the detection of unbalanced rotors was made. The forces generated in unbalance generate dynamic forces that reduce the useful life of the rotating equipment causing the increase in "Cost of Maintenance", the reduction of "Mean Time Between Failures (MTBF)" and an increase in unavailability of the asset. The tests were performed in a didactic workbench composed by a two-pole motor and a rotor. Several levels of imbalance were introduced through four masses (1.0; 1.8; 3.0; and 5.2g), aiming to observe the dynamic behavior of the set and the detection efficiency of the dynamic imbalance through the abovementioned parameters. With the collected data it was possible to correlate the effects of dynamic unbalance, confirming a linear pattern between temperature/vibration and electric current/vibration. It was concluded that through the insertion of the controlled fault the unbalanced bands can be delimited, considering the levels: Good, Satisfactory, Unsatisfactory and Unacceptable. A correlation of the global levels of vibration for temperature and electric current was made, specifically for dynamic unbalance in study. Thus, it is possible, with simple instruments ("Vibration Pen", Temperature Sensor and Digital

Clamp Meter) to correlate different monitoring techniques and identify the change in the dynamic behavior of the active in the initial phase, which allows a planned corrective action.

**KEYWORDS:** Unbalance, Vibration, Temperature, Electrical Current.

## INTRODUÇÃO

Em todas as fábricas, a maioria dos sistemas dinâmicos tem movimento rotativo, uma consequência direta dos acionamentos por motores rotativos. Destes, quase todos são elétricos e estão sujeitos a várias falhas e requerem manutenção específica. Considerando os locais onde atuam na produção, esses motores podem, se falharem, comprometer toda a linha e causar perdas irreparáveis. Assim, em certos casos, não é suficiente simplesmente substituir um componente defeituoso ou substituir vários deles antes que ocorra qualquer falha. É necessário monitorar e prever o momento certo para fazer a correção. A manutenção preditiva também é essencial para muitas operações. Estende a vida útil do equipamento, melhora a disponibilidade do equipamento e retém equipamentos em condições adequadas, MALETIC (2014).

Muitas falhas são comuns em máquinas rotativas, inevitáveis, mas controláveis. Desalinhamento e folga mecânica devido ao movimento vibratório do mecanismo e principalmente, o desequilíbrio devido a imperfeições nos materiais, bem como agregados que impedem a concentricidade. O centro de massa nunca coincide com o centro de rotação nos rotores reais, HEINDEL (2017). Este desequilíbrio torna-se ainda mais sério, causando uma força peso resultante no centro do eixo causando momentos que causam movimento durante a rotação. Isso causa vibração, o que, por sua vez, envolve várias outras falhas. Desta forma, deve ser assegurado que o desequilíbrio nunca deixa valores aceitáveis. Um grande número de publicações lida com SCHMIDT (2017) e SOEIRO (2010), problemas de desequilíbrio e, portanto, reflete sua importância geral.

A função primordial de um sistema de monitoramento é reconhecer o desenvolvimento para encerrar a correção do problema, RIBEIRO (2013) e este trabalho propõe fazê-lo de maneira diferente. Desta forma, o foco deste trabalho é validar a data de temperatura e corrente elétrica por meio de análise de vibração em um sistema mecânico rotativo com diferentes níveis de desequilíbrio. Criar um mecanismo capaz de se tornar a base para sistemas de monitoramento de baixo custo e permitir que ele seja usado em fábricas de pequeno e médio porte.

## MATERIAIS E MÉTODOS

A aquisição de dados foi realizada através de testes em uma bancada didática composta por um motor de dois polos e um rotor (disco de alumínio, de diâmetro de 18 mm e espessura de 7 mm), devidamente balanceada através do Microlog GX 75. O nível global de vibração e a temperatura foram obtidos através da Caneta de Vibração (CMAS 100-SL), os dados da corrente elétrica foram obtidos com o alicate amperímetro Digital Clamp Meter ET-3367 e os sinais de vibração foram obtidos através do Microlog GX 75 e serviram para validar os dados dos parâmetros obtidos através da Caneta de Vibração.

Figura 1-Bancada de testes<sup>1</sup>, Microlog GX 75<sup>2</sup>, Caneta de Vibração (CMAS 100-SL)<sup>3</sup>, Digital Clamp Meter ET-3367<sup>4</sup>.



As coletas foram realizadas intercalando-se todos os equipamentos durante o período de uma hora, em um intervalo médio de tempo de 3 minutos, na segunda hora de funcionamento. Primeiramente foi tirada a assinatura da máquina, logo após foram inseridos diversos níveis de desbalanceamento

através de quatro massas (1,0; 1,8; 3,0 e 5,2 g), sendo cada uma constituída de um conjunto composto de um parafuso, duas ou mais arruelas e uma porca

Com o intuito de qualificar os dados obtidos experimentalmente foi utilizado um critério de avaliação de nível de desbalanceamento análogo a Norma ISO 10816-1, que os classifica como:

Tabela 1-Valores de Vibração para limites de máquina

| Velocity Severity<br>mm/s RMS | Velocity Range Limits and Machine Classes |                             |                             |                                 |
|-------------------------------|---|-----------------------------|-----------------------------|---------------------------------|
|                               | Small Machines<br>Class I                 | Medium Machines<br>Class II | Large Machines              |                                 |
|                               |   |                             | Rigid Supports<br>Class III | Less Rigid Supports<br>Class IV |
| 0,28                          | Good                                      | Good                        | Good                        | Good                            |
| 0,45                          |   |                             |                             |                                 |
| 0,71                          | Satisfactory                              | Satisfactory                | Satisfactory                | Satisfactory                    |
| 1,12                          |   |                             |                             |                                 |
| 1,8                           | Unsatisfactory<br>(ALERT)                 | Unsatisfactory<br>(ALERT)   | Satisfactory                | Satisfactory                    |
| 2,8                           |   |                             |                             |                                 |
| 4,5                           | Unacceptable<br>(DANGER)                  | Unacceptable<br>(DANGER)    | Unsatisfactory<br>(ALERT)   | Unsatisfactory<br>(ALERT)       |
| 7,1                           |   |                             |                             |                                 |
| 11,2                          | Unacceptable<br>(DANGER)                  | Unacceptable<br>(DANGER)    | Unacceptable<br>(DANGER)    | Unacceptable<br>(DANGER)        |
| 18                            |   |                             |                             |                                 |
| 28                            | Unacceptable<br>(DANGER)                  | Unacceptable<br>(DANGER)    | Unacceptable<br>(DANGER)    | Unacceptable<br>(DANGER)        |
| 45                            |   |                             |                             |                                 |

O motor utilizado no estudo é compreendido na classe I, motores individuais acoplados a máquinas individuais operando em condições normais (máquinas até 15 KW), e os níveis de vibração da Norma ISO 10816-1 são: Good (A) Relativa a um motor recém comissionado (novo); Satisfactory (B) Operação de longo tempo (não definido); Unsatisfactory (C) Operação de curto tempo; e Unacceptable (D) Vibração que causa dano.

Os quais restringem a operação, sendo que os níveis A e B, não apresentam qualquer perigo ao sistema. O nível C é recomendado somente para operações de curto prazo causando danos ao sistema em operações mais extensas. E o nível D já causa dano ao sistema em qualquer tipo de operação. Devido ao extenso intervalo entre os níveis, para correlacionar os efeitos do desbalanceamento, foram incluídas em cada critério, as vibrações abaixo do limite inferior do seguinte, de forma que “A” é composto de vibrações até 1,11 mm/s, “B” até 2,79 mm/s e “C” até 7,09 mm/s.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados obtidos nos testes de cada massa agindo individualmente em cada técnica estão apresentados nas tabelas de 2 a 4.

Em primeiro lugar, no âmbito da vibração os resultados foram:

Tabela 2-Intervalos de vibração.

| Teste                     | Mínima (mm/s) | Máxima (mm/s) | Média (mm/s) |
|---------------------------|---------------|---------------|--------------|
| 1) balanceado             | 0,695         | 1,095         | 0,942        |
| 2) desbalanceado em 1g    | 2,667         | 3,376         | 3,067        |
| 3) desbalanceado em 1.8 g | 5,330         | 6,678         | 6,270        |
| 4) desbalanceado em 3g    | 8,362         | 10,658        | 9,944        |
| 5) desbalanceado em 5.2 g | 14,065        | 18,056        | 16,480       |

O teste 1 compreendeu o nível “A” de vibração da norma ISO 10816-1. O nível “B” não foi obtido uma vez que, no sistema estudado, para tal obtenção seria necessária uma massa desbalanceadora com uma magnitude inferior a 1g, o que não foi possível. O 2 abrangeu o limite inferior do “C” e o 3 abrangeu o limite superior. Os testes 4 e 5 estão no nível “D”.

Sob o aspecto de temperatura os intervalos obtidos foram:

Tabela 3-Intervalos de temperatura.

| Teste                     | Mínima (°C) | Máxima (°C) | Média (°C) |
|---------------------------|-------------|-------------|------------|
| 1) balanceado             | 30,8        | 37,4        | 34,5       |
| 2) desbalanceado em 1g    | 37,9        | 39,7        | 38,6       |
| 3) desbalanceado em 1.8 g | 38          | 43, 2       | 40,7       |
| 4) desbalanceado em 3g    | 37,2        | 44,4        | 42         |
| 5) desbalanceado em 5.2 g | 43,3        | 46,7        | 45,1       |

Os dados respeitaram e confirmaram um padrão linear, onde a temperatura é proporcional a vibração. Alguns intervalos apresentação interseção com o seguinte, isso ocorreu em parte pelos testes sofrerem interferência com a temperatura externa, e devido a coleta de dados ter ocorrido na segunda hora de execução, ou seja, o equipamento no âmbito térmico ainda estava em regime transiente.

Por último, sob o aspecto de corrente elétrica os intervalos obtidos foram:

Tabela 4- Intervalos de corrente elétrica.

| Teste                     | Mínimo (A) | Máximo (A) | Média (A) |
|---------------------------|------------|------------|-----------|
| 1) balanceado             | 8,2        | 8,5        | 8,36      |
| 2) desbalanceado em 1g    | 8,3        | 8,7        | 8,46      |
| 3) desbalanceado em 1.8 g | 8,3        | 8,7        | 8,48      |
| 4) desbalanceado em 3g    | 8,3        | 8,8        | 8,52      |
| 5) desbalanceado em 5.2 g | 8,5        | 8,6        | 8,54      |

A corrente elétrica também apresenta um aumento linear de acordo com a agravação do desbalanceamento. Isto é justificado pelo aumento da temperatura de trabalho e vibração, ambos contribuindo para o aumento do trabalho motor. No entanto, esta elevação é pequena em comparação com outras técnicas. Muitos testes encontraram valores semelhantes para diferentes condições, mas ao analisar em um intervalo de tempo, a média mostra um padrão. Isso é resultado da pequena variação desses dados.

A tabela 5 mostra a variação através da porcentagem para cada situação, onde pode-se mesurar a dificuldade de monitorar o desbalanceamento pela temperatura e ainda maior pela corrente elétrica.

Tabela 5-Aumento percentual dos índices apurados.

| Teste                     | Vibração (%) | Temperatura (%) | Corrente elétrica (%) |
|---------------------------|--------------|-----------------|-----------------------|
| 1) balanceado             | 100,00       | 100,00          | 100,00                |
| 2) desbalanceado em 1g    | 325,58       | 111,88          | 101,20                |
| 3) desbalanceado em 1.8 g | 665,61       | 117,97          | 101,44                |
| 4) desbalanceado em 3g    | 1055,63      | 121,74          | 101,91                |
| 5) desbalanceado em 5.2 g | 1749,45      | 130,72          | 102,53                |

Com os dados obtidos pelos testes com as massas é possível construir um análogo como mostrado na Tabela 1 pela ISO 10816-1, incluindo os intervalos de vibração, as respectivas faixas de temperatura, para o motor de estudo, conforme Tabela 5.

Tabela 6-Critérios de severidade pela velocidade, temperatura e corrente elétrica, modelo ISO10816-1.

| SMALL MACHINES Class I |                               |                            |                                   |
|------------------------|-------------------------------|----------------------------|-----------------------------------|
| Velocity Range Limits  | Velocity Severity<br>mm/s RMS | Temperature Severity<br>°C | Electrical Current<br>A (average) |
| Good                   | Until 1,119                   | Until 37,4                 | Until 8,4                         |
| Satisfactory           | 1,12 to 2,799                 | -                          | -                                 |
| Unsatisfactory         | 2,8 to 4,499                  | 37,9 to 39,7               | 8,5                               |
| ALERT                  | 4,5 to 7,099                  | 39,7 to 41,0               |                                   |
| Unacceptable           | 7,1 to 11,199                 | 41,1 to 44,4               | 8,5 <                             |
| DANGER                 | 11,2 to 17,999                | 44,5 to 46,7               |                                   |
|                        | 18 <                          | 46,7 <                     | 8,6 <                             |

## CONCLUSÃO

Neste estudo foi possível correlacionar nível global de vibração, temperatura e corrente elétrica visando o diagnóstico e o monitoramento de desbalanceamento. Através da inserção da falha controlada delimitou-se as faixas de desbalanceamento, considerando-se os seguintes níveis: Good, Satisfactory, Unsatisfactory e Unacceptable. De forma análoga à norma ISO 10816-1, fez-se a correlação, especificamente para o desbalanceamento dinâmico em estudo. Dessa forma foi possível, com instrumentos simples (Caneta de Vibração, Sensor de Temperatura e Alicata Amperímetro) correlacionar diferentes técnicas de monitoramento e identificar a alteração do comportamento dinâmico do ativo na fase inicial, o que permite uma ação corretiva planejada. Lembrando sempre da necessidade de os instrumentos serem calibrados corretamente para evitar medidas erradas.

Trata-se de uma pesquisa ainda em execução e o próximo passo será a validação dos dados com outra máquina de mesma classe, com o objetivo de descrever com mais eficácia o comportamento da corrente elétrica para desbalanceamento de rotores, além de confirmar ou não os intervalos obtidos para temperatura. Busca-se também correlacionar as técnicas aqui utilizadas, com outras falhas mecânicas, tais como desalinhamento e folga, visando desenvolver métodos de análise de falhas através temperatura e corrente, permitindo-se verificar até que ponto determinada falha influência nos valores obtidos de temperatura e corrente elétrica.

## AGRADECIMENTOS

Gostaríamos de agradecer ao grupo de estudos Gep\_LASID, onde foi realizado esse estudo, em particular a dois membros que auxiliaram na coleta do banco de dados Mariana Fernandes e Leonardo Vasconcelos.

## REFERÊNCIAS

- Heindel, S., Becker, F., Rinderknecht, S.: Unbalance and resonance eliminace with active bearings on a Jeffcott Rotor. *Mechanical Systems and Signal Processing* 85, 339–353 (2017).
- Maletic, D., Maletic, M., Al-Najjar, B., Gomiscek, B.: The role of maintenance in improving company's competitiveness and profitability: a case study in a textile company, *Journal of Manufacturing Technology Management*, 25(4), pp. 441-456 (2014).
- Ribeiro, L. C., Bonaldi, E. L., Oliveira, L.E.L., Silva L.E.B., Salomon, C. P., Santana, W. C., Silva, J. G. B., Lambert-Torres, G.: Equipment for Predictive Maintenance in Hydrogenerators. In: 2nd AAASRI Conference on Power and energy Systems, pp. 75 – 80, AASRI Procedia, (2014).
- International Organization for Standardization. ISO 10816-1: Mechanical vibration – Evaluation of machine vibration by measurements on non-rotating parts.
- Schmidt, B., Wang, L., Galar, D.: Semantic framework for predictive maintenance in a cloud environment. In: 10th CIRP Conference on Intelligent Computation in Manufacturing Engineering, pp. 583 – 588, Procedia CIRP, (2017).
- Soeiro, N. S., Mesquita, A. L. A., Melo, G. S. V., Costa, E. S.: Desenvolvimento de banca experimental para estudo de dinâmica de rotor e implementação de procedimentos de balanceamento de rotor rígido e rotor flexível. In: VI National Congress of Mechanical Engineering, (2010).