

Manutenção Preditiva na indústria 4.0

Luciano Baldissarelli e Elton Fabro

Resumo

No momento atual, onde os equipamentos relacionados ao processo produtivo necessitam estar sempre disponíveis, a manutenção começa a desempenhar um papel estratégico dentro da empresa. Frequentemente a manutenção se depara com situações onde a agilidade na liberação de equipamentos é primordial. Buscando minimizar as paradas de planta o trabalho de detecção antecipada de falhas nos equipamentos é uma necessidade presente nas indústrias. Este trabalho apresenta o desenvolvimento de uma solução em manutenção preditiva de equipamentos rotativos industriais. Com o objetivo de identificar vibrações no motor e mancais do conjunto do ventilador de um exaustor industrial usando ferramentas da indústria 4.0 para uma monitoração online do equipamento. A análise foi realizada em caráter experimental através de sensores de vibração (acelerômetros) instalados em um exaustor industrial. Esse sistema é conectado em rede com servidor local, onde as anomalias podem ser acompanhadas em qualquer terminal da fábrica ou até mesmo por um smartphone.

Palavras-chave

Análise, vibração, detecção, monitoração, manutenção, *online*, indústria 4.0, exaustor;

Predictive Maintenance in Industry 4.0

Luciano Baldissarelli and Elton Fabro

Abstract

At the present time, where equipment related to the production process needs to be always available, maintenance begins to play a strategic role within the company. Often maintenance is faced with situations where agility in releasing equipment is paramount. Seeking to minimize plant shutdowns, the early detection of equipment failure is a necessity in industries. This paper presents the development of a predictive maintenance solution for industrial rotary equipment. To identify vibrations in the motor and fan assembly bearings of an industrial exhaust fan using industry-standard 4.0 tools for online monitoring of the equipment. The analysis was performed on an experimental basis through vibration sensors (accelerometers) installed in an industrial exhaust fan. This system is networked with a local server, where anomalies can be monitored at any factory terminal or even by a Smartphone.

Key words

Analysis, vibration, predictive, monitoring, maintenance, online, industry 4.0, exhaust fan;

I. INTRODUÇÃO

O objetivo da manutenção é sempre maximizar a disponibilidade dos equipamentos, seja nas suas condições originais ou ao menos nas condições necessárias para operação.

A manutenção tem passado por sérias mudanças, mais que qualquer outra atividade. Isso é devido a um aumento rápido do número e diversidade de itens físicos em instalações, equipamentos e edificações que devem ser mantidos [3]. Outro fator são os projetos cada vez mais complexos, exigindo novas técnicas, novo enfoque na estruturação e organização da manutenção.

A mão de obra da manutenção exige uma nova postura de sua equipe, que inclui uma crescente conscientização de quando uma falha de equipamento afeta a segurança ou o

meio ambiente, maior conscientização da relação entre manutenção e qualidade do produto [3].

A cobrança pelo aumento da disponibilidade e confiabilidade dos equipamentos e redução de custos é cada vez maior. Tais alterações exigem novas atitudes e habilidades de todo corpo da manutenção [3].

Com base nessa nova visão a manutenção passa a ser uma função estratégica tendo em vista sua importância dentro da empresa. Logo, a técnica preditiva, conhecida internacionalmente com “*condition monitoring*” vem evoluindo gradativamente em sua aplicação [5]. A manutenção preditiva tem como finalidade definir os parâmetros a serem medidos e determinar os limites a serem tolerados. Assim, com essas informações são tomadas ações para anteceder possíveis falhas mais graves, minimizando o

*Pós-Graduação em Engenharia Industrial - Universidade de Caxias do Sul (UCS)

Emails: lucbal25@hotmail.com, efabro1@ucs.br

Data de envio: 12/11/2018

Data de aceite: 01/04/2019

<http://dx.doi.org/10.18226/23185279.v7iss2p12>

tempo de parada de um equipamento ou planta e diminuindo o custo do reparo.

II. REFERENCIAL TEÓRICO

Nesta seção são revisados os conceitos e o referencial teórico para um entendimento dos processos de manutenção e também nas práticas de medição de vibração mecânica em equipamentos industriais.

A. Indicadores de Manutenção

A eficiência da manutenção é medida com base em três principais indicadores. A disponibilidade indica o percentual do equipamento disponível para o processo produtivo. O cálculo da disponibilidade depende de dois outros indicadores, tempo médio entre falhas e tempo médio de reparo.

O tempo médio entre falhas (TMEF ou MTBF) é a média aritmética entre falhas, considerando somente o tempo em funcionamento.

$$TMEF = \frac{TOPT}{n} \tag{1}$$

Onde:

TMEF: tempo médio entre falhas

TOPT: tempo total operando

n: número de falhas

O tempo médio para reparo (TMPR ou MTTR) é o tempo médio para reparo de um equipamento.

$$TMPR = \frac{TMPT}{n} \tag{2}$$

Onde:

TMPR: tempo médio para reparo

TOPT: tempo total em reparo

n: número de falhas

Com esses dois indicadores é possível calcular a disponibilidade.

$$DISP = \frac{TMEF}{TMEF + TMPR} \tag{3}$$

Onde:

DISP: disponibilidade

TMEF: tempo médio entre falhas

TMPR: tempo médio para reparo

B. Classificação dos equipamentos

O custo para se atingir maior disponibilidade dos equipamentos nem sempre é compensador, logo a classificação dos ativos de uma fábrica de grande porte direciona esforços da mão obra disponível na manutenção. A classificação dos equipamentos em A, B ou C deve ser feita em conjunto com as áreas estratégicas de cada empresa. Geralmente envolvendo Segurança, Meio Ambiente, Qualidade e Manufatura junto à Manutenção [1]. Essa política acarretará em maior disponibilidade em equipamentos chaves para a empresa. Abaixo na Tabela I, podemos ver um exemplo de classificação.

Tabela I - Classificação ABC

CLASSIFICAÇÃO DOS EQUIPAMENTOS			
ÁREA	Nº	CATEGORIA	CRITÉRIOS
MANUFATURA	1	Carga da máquina	4= trabalha em 03 turnos 2= trabalha em 02 turnos 1= trabalha em 01 turno
	2	Substituição da máquina	4= não (Impossível) 1= sim (É possível)
	3	Influencia parada de produção	4= percebido no cliente Montadora 2= percebido no cliente externo 1= percebido no cliente interno 4=FMEA Característica crítica
QUALIDADE	4	Influencia Qualidade final	3= Reclamações clientes 2= não conformidades internas 1= Não Influencia sobre a Qualidade final
MANUTENÇÃO	5	Tempo de parada para reparação	4=> 8h por pane 2= entre 2h - 8h por pane 1=<2h por pane
	6	Tempo de reposição /peças	4= > 48hs 2= entre 24 e 48 1= < 24hs
MEIO AMBIENTE	7	Custos de manutenção anual	4 = ≥ R\$: 30.000 2 = ≥ 10,000 < 30.000 1 = ≤ 10.000
	8	Influência no meio ambiente	5= Impacto que atinge a circunvizinhança 2= Impacto no local de trabalho 1= Baixo impacto
SEGURANÇA	9	Influencia na Segurança	5= elevado risco de acidente 4= médio risco de acidente 2= Baixo risco de acidente 1= nenhum risco de acidente

C. Tipos de manutenção

A manutenção, tradicionalmente é dividida de acordo com a forma de programação e o objetivo das tarefas a serem executadas [2].

Com relação à programação, são comuns as classes de manutenção programada e não programada, respectivamente, as atividades são designadas obedecendo critérios de tempo e condições pré-definidas e as executadas em função da necessidade;

Quanto ao objetivo, geralmente são definidos quatro tipos de manutenção [3]:

1) *Corretiva ou reativa*: tem a finalidade de corrigir uma falha ou o desempenho menor do que esperado de um equipamento dentro do processo de produção de acordo com o que foi definido em seu projeto. Pode ser subdividida em programada e não programada [6].

2) *Preventiva*: destina-se a reduzir a probabilidade de quebra, evitar a falha ou queda no desempenho, obedecendo a um plano previamente elaborado, baseado em intervalos definidos de tempo [6].

3) *Preditiva*: é a atuação realizada com base na modificação de parâmetros de condição ou desempenho, cujo acompanhamento obedece a uma sistemática. A manutenção preditiva também é conhecida como manutenção sob condição ou manutenção com base no estado do equipamento. É baseada na tentativa de definir o estado futuro de um equipamento ou sistema, por meio dos dados coletados ao longo do tempo por uma instrumentação específica, verificando e analisando a tendência de variáveis do equipamento [6].

4) *Detectiva*: é a atuação efetuada em sistemas de proteção, comando e controle, buscando detectar falhas ocultas ou não perceptíveis ao pessoal de operação e manutenção [6].

A engenharia de manutenção tem como funções fundamentais a realização sistemática da coleta, o tratamento dos dados para subsidiar os estudos e as análises de manutenção, bem como a proposição de melhorias para o processo de gestão e execução da manutenção e melhoria do desempenho operacional dos equipamentos e instalações [4].

Dentre os tipos de manutenção, a preditiva se destaca pela capacidade da antecipação as falhas. Além de ser vantajosa em relação aos demais tipos quanto ao custo, a preditiva direciona a empresa para a indústria 4.0, conforme evolução na figura 1.

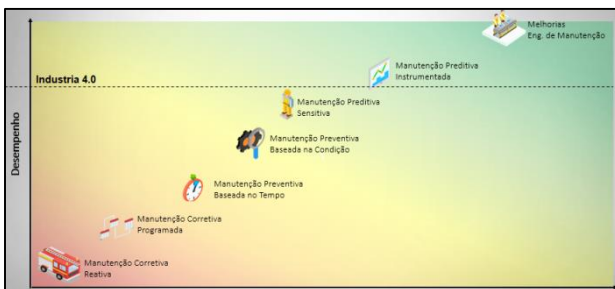


Fig. 1: desempenho da manutenção para a indústria 4.0

A curva PF, (Falha Potencial) na figura 2, exemplifica uma vantagem da técnica em relação ao funcionamento do equipamento. Onde a falha é perceptível ainda no início e com uma tendência menor de quebra do equipamento.

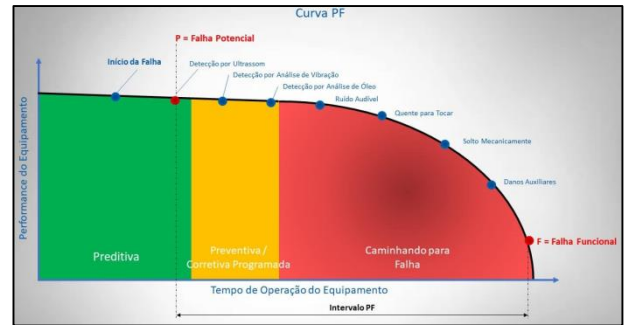


Fig. 2: Curva de Falha Potencial

De acordo com o gráfico a falha é detectada ainda em tempo de atuação e programação de parada controlada.

D. Tipos de Falha

A falha se caracteriza por uma interrupção ou alteração da capacidade de um item desempenhar uma função requerida ou esperada [2].

De acordo com a Norma NBR 5462 (ABNT) [6], as falhas podem ser classificadas em quatro tipos:

1) *Falha gradual*: são aquelas que poderiam ser detectadas a partir de uma análise prévia.

2) *Falha parcial*: quando há desvios das características do item, além de limites especificados, mas não ao ponto de causar perda total da função requerida.

3) *Falha por defeito*: são falhas simultâneas graduais e parciais, podendo ao longo do tempo se tornar mais completas.

4) *Falha completa*: quando um item deixa de desempenhar a função requerida;

Existem várias falhas que podem ser identificadas por análise de vibração. Em máquinas rotativas podemos citar algumas mais importantes como: máquina fora de balanceamento, máquina fora de alinhamento, ressonância, eixos curvos, recirculação e cavitação, falhas do motor (rotor e estator), falhas nos mancais, falhas nos rolamentos, folga mecânica, velocidades críticas da máquina [3].

E. Técnicas Preditivas

Como já visto anteriormente a técnica preditiva indica a necessidade de intervenção com base no estado atual do equipamento. Essa avaliação pode ser feita através de medição, acompanhamento ou monitoramento de parâmetros.

Esse acompanhamento pode ser feito de três formas [3]:

1) *Subjetivo*: essa técnica depende muito da mão de obra qualificada do manutentor, onde através dos sentidos, visão, audição, tato, olfato detectam alguma anormalidade no equipamento.

2) *Objetivo*: é realizado ou acompanhado com base em medições utilizando equipamentos ou instrumentos especiais. Esses dão resultados que são arquivados e comparados com parâmetros base, ou histórico do equipamento que definem a ação a ser tomada pela manutenção.

3) *Contínuo*: é técnica usada para monitoramento de defeitos ou falhas geralmente em equipamentos de alta responsabilidade. Usualmente vem associado a dispositivos que tomam alguma ação, interagem com o operador ou responsável técnico, uma vez atingido o valor limite estipulado.

Com o desenvolvimento da eletrônica e de sistemas digitais a oferta de sistemas de monitoração cresceu muito e conseqüentemente o leque de aplicações, com isso também houve a redução do custo desses sistemas [3]. Assim, é possível a monitoração de variáveis típicas de processos como densidade, vazão, pressão, temperatura, vibração, etc.

F. Vibrações Mecânicas

Vibração se define quando um corpo esta em movimento oscilatório em torno de uma referência [8]. O acompanhamento e análise de vibração estão entre os mais importantes métodos de predição na indústria atualmente [3]. A maior ênfase esta nas máquinas rotativas onde a evolução das técnicas preditivas quanto nos equipamentos e software permitem um avançado método de manutenção. No entanto, o monitoramento de vibração não pode fornecer todas as informações que serão necessárias para um programa de manutenção baseado em condição bem sucedida. Essa técnica é limitada ao monitoramento da condição mecânica e não a outros parâmetros críticos necessários para manter a confiabilidade e a eficiência do maquinário. Portanto, um programa abrangente de manutenção baseado em condições deve incluir outras técnicas de monitoramento e diagnóstico.

O uso da técnica de análise de vibrações, no entanto, não se restringe ao monitoramento de condições. Também pode ser usado para fins de diagnóstico. Na verdade, ele pode ser considerado como uma ferramenta de diagnóstico principal para a maioria dos sistemas usados para fabricar ou montar produtos [3]. Uma prática correta de Manutenção Preditiva irá ajudar na redução de custos de manutenção, quando comparado a outras técnicas, conforme ilustrado na figura 3.

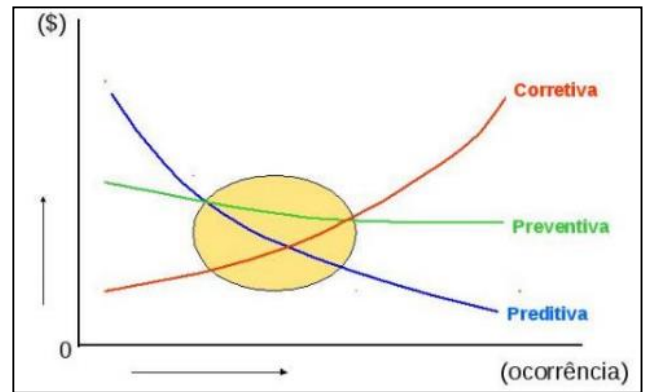


Fig. 3: Tipo de manutenção x custo

G. Método do estudo das Vibrações

Os equipamentos giratórios geram ruídos e vibrações, que podem ser originadas por defeitos mecânicos ou excitações secundárias. Esses fenômenos vibratórios são compostos de frequências, onde através da análise desses sinais é possível determinar valores individuais de amplitude e de possíveis defasagens entre elas. O método tipicamente usado para análise em frequência é o do físico e matemático Jean Baptiste Fourier (1768-1830) [12].

A transformada de Fourier (4) é a técnica mais usada nos analisadores de vibração atualmente. A partir de n amostras do sinal no domínio do tempo, calcula o espectro de frequências composto de m valores distintos.

$$X(m) = \frac{1}{N_a} \sum_{n=0}^{N_a-1} x(n) e^{-i2\pi \frac{nm}{N_a}} \quad (4)$$

Onde: $X(m)$ é o resultado da FFT de um sinal discretizado no domínio do tempo com m bandas discretas. $N_a = a.m$, é o número de amostras a serem coletadas para formação de um espectro de frequências, onde a maioria dos analisadores adota $a = 2,56$ [12].

Os sinais de vibração com características senoidais compostas podem ser expressos em termos de seu deslocamento (5), velocidade (6) e aceleração (7). Considerando que a composição das senóides é similar a uma senoide simples, podemos escrever:

$$x(t) = x_0 \cdot \text{sen}(\omega t) \quad (5)$$

$$\frac{dx(t)}{dt} = \omega x_0 \cdot \text{cos}(\omega t) \quad (6)$$

$$\frac{d^2x(t)}{dt^2} = -\omega^2 x_0 \cdot \text{sen}(\omega t) \quad (7)$$

Onde: x_0 é a amplitude do deslocamento.

O deslocamento é utilizado na identificação de desbalanceamento, empenamento de eixo, folgas mecânicas e fadigas. A velocidade indica o nível de energia envolvido no movimento, é a medida mais usada na detecção de vibração. E a relação da aceleração e frequência identifica problemas em altas frequências,

como pista externa de um rolamento [12].

Os defeitos de rolamento trazem um cálculo das frequências que apontam problemas relativos pista interna, pista externa, esfera e gaiola [12].

- Frequência de passagem de elementos rolantes por um ponto da pista interna (8), geralmente indicada por BPFi do inglês (*Ball Pass Frequency Inner Race*), associada a defeitos na pista interna.

$$BPFi = \frac{f_0 z \left[1 + \left(\frac{d}{D} \right) \cos \beta \right]}{2} \quad (8)$$

- Frequência de passagem de elementos rolantes por um ponto da pista externa (9), geralmente indicada por BPFO do inglês (*Ball Pass Frequency Outer Race*), associada a defeitos na pista externa.

$$BPFO = \frac{f_0 z \left[1 - \left(\frac{d}{D} \right) \cos \beta \right]}{2} \quad (9)$$

- Frequência de giro dos elementos (10), geralmente indicada por BSF do inglês (*Ball Spin Frequency*), associada a defeitos nos elementos rolantes (rolos ou esferas).

$$BSF = f_0 \left(\frac{D}{d} \right) \left[1 - \left(\frac{d}{D} \cos \beta \right)^2 \right] \quad (10)$$

- Frequência de giro da gaiola ou do conjunto de elementos rolantes (11), geralmente indicada por FTF do inglês (*Fundamental Train Frequency*), associada a defeitos na gaiola e a defeitos em alguns dos elementos rolantes.

$$FTF = \frac{f_0 \left[1 - \left(\frac{d}{D} \right) \cos \beta \right]}{2} \quad (11)$$

Onde: f_0 é frequência de giro relativo entre as pistas internas e externas do rolamento.

O d é diâmetro do elemento rolante.

O D é o diâmetro primitivo do rolamento, entre as linhas de centro do elemento rolante.

β é o ângulo de contato entre as esferas e as pistas.

z é o numero de elementos rolantes.

A figura 4 exemplifica as formas de onda numa aplicação.

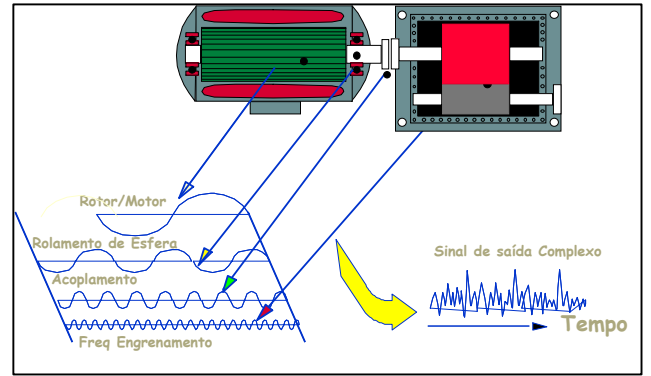


Fig. 4: Formas de onda ilustrativas de acordo com o defeito.

A amplitude de uma vibração define a sua severidade e pode ser classificada de várias formas. A relação entre o nível pico-a-pico, nível de pico, nível médio e nível RMS de um sinal senoidal.

O valor pico-a-pico indica a máxima amplitude da onda e é usado, por exemplo, onde o deslocamento vibratório da máquina é parte crítica na tensão máxima de elementos de máquina.

O valor de pico é particularmente usado na indicação de níveis de impacto de curta duração.

O valor médio (12), por outro lado, é usado quando se quer se levar em conta um valor da quantidade física da amplitude em um determinado tempo [8].

$$Valor\ Médio = \frac{1}{\Delta t} \int_0^{\Delta t} f(t) dt \quad (12)$$

O valor RMS (*root mean square*) (13), conhecido como valor eficaz, está diretamente relacionado com nível de energia da vibração. Ele indica o potencial dano associado ao movimento vibratório.

$$RMS = \sqrt{\frac{1}{\Delta t} \int_0^{\Delta t} f(t) dt} \quad (13)$$

Onde $f(t)$ é a grandeza de vibração que se deseja mensurar. O Δt é o intervalo de tempo que se desenvolve o movimento.

Há também uma maneira de medir um único valor para medir a vibração de um equipamento. O valor global (14) de vibração (*overall*) (14), que é obtido em banda larga (10 e 1.000hz ou 10 e 10.000hz). O valor global pode ser obtido através da análise de qualquer grandeza (deslocamento, velocidade ou aceleração), assim é feito o somatório das influências de cada frequência [12].

$$VG = \sqrt{\sum_{k=1}^m X(k)^2} \quad (14)$$

Onde $X(k)$ é a amplitude do sinal de vibração na frequência analisada. E k é o numero de bandas de frequências analisadas. A figura 5 mostra o comparativo entre os sinais medidos.

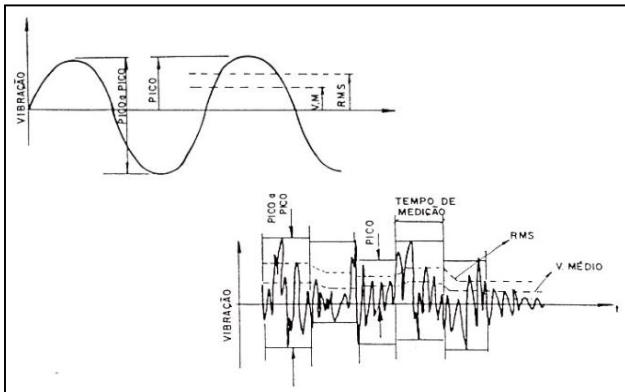


Fig. 5: Comparativo entre sinais pico-a-pico, pico, valor médio e RMS

H. Acelerômetros

Os acelerômetros são os transdutores mais usados na medição de vibrações mecânicas atualmente. São caracterizados por uma boa linearidade e banda dinâmica maior. Acelerômetros piezoelétricos são também bons autogeradores de sinal, não necessitando de fontes externas, não possuem partes móveis e geram um sinal proporcional a sua aceleração o que facilita a integração do sinal, obtendo a velocidade e o deslocamento [3]. As vibrações nas máquinas produzem excitações onde a massa faz uma força variável nos cristais piezoelétricos. A força é transformada então em pulsos elétricos proporcionais a aceleração. Na figura 6 as principais partes construtivas de um acelerômetro.

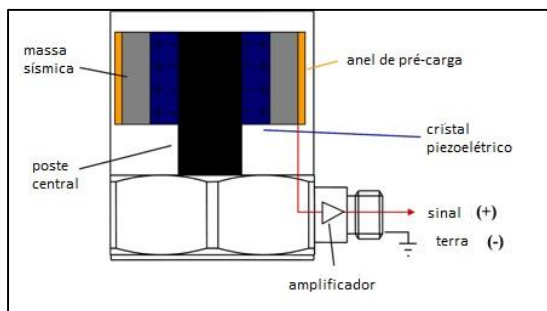


Fig. 6: Acelerômetro

A fixação dos sensores deve sempre ser feita em uma base plana do equipamento (motor ou mancal), onde essa superfície não é completamente plana é preciso fixar uma base de metal onde será instalado o sensor. Os acelerômetros podem ser fixados nas posições axial, radial e vertical.

Horizontal: normalmente, eixos desalinhados tendem a ocasionar vibrações radiais (horizontal e vertical), dependendo do design do suporte. Vertical: a vibração vertical em excesso pode indicar frouxidão mecânica, além de falta de desequilíbrio. Axial: vibração axial em excesso é um forte indicador de desalinhamento. O contato do sensor deve sempre ser perpendicular à linha de centro do acionamento.

Em mancais de rolamento, relacionados com as pistas, esferas e gaiola, geram amplitudes em regiões de altas frequências. Logo, os acelerômetros são mais indicados para essa aplicação [3].

Os pontos de fixação devem seguir uma sequência numérica ou alfabética. Partindo do sensor 1 ou A, mancal lado oposto ao acoplamento da unidade acionadora, geralmente um motor ou turbina. Os demais pontos serão definidos em sequência de acordo com o fluxo de energia através do sistema conforme figura 7.

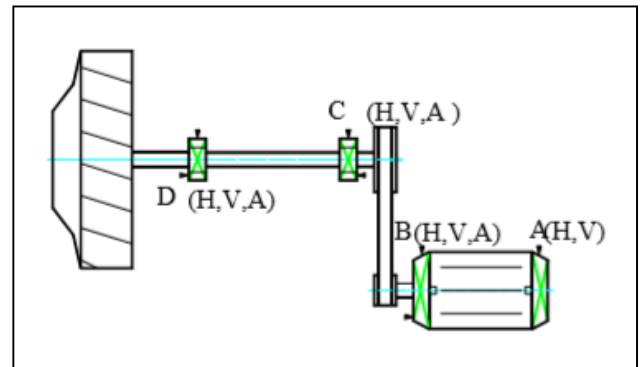


Fig. 7: Pontos de medição

I. Sistemas de monitoração

Nas últimas décadas os sistemas de monitoração tiveram uma apreciável evolução, passando a serem sistemas integrados com funções avançadas de vigilância e monitoração de performance dos equipamentos [3]. O monitoramento pode ser (contínuo *online*/intermitente) ou *off-line* (intermitente). No caso do sistema *off-line* é usado em equipamentos menos críticos, onde há um roteiro de preventiva realizando a coleta dos dados manualmente. Já no sistema *online*, onde a criticidade é maior ele pode ser contínuo, ou seja, fica monitorado o tempo todo, ou ainda intermitente, o qual pode ser intercalado com tempos pré-determinados. Isso permite diagnósticos mais precisos e rápidos, com leituras *online* do estado do equipamento e suas subpartes. Alguns sistemas já usam rede *wifi* para comunicação dos dados, porém dependem da qualidade da rede local, pois se tratando de indústria há muitas interferências de sinal, desqualificando esses sistemas.

J. Normas técnicas

De acordo com a Norma ISO 10816-1, as seguintes classes de equipamentos são apropriadas para a maioria das aplicações:

CLASSE I: Máquinas pequenas: Partes individuais de máquinas e motores, integralmente conectados com toda a máquina em sua condição de operação normal, motores elétricos até 15 kW são exemplos típicos de máquinas desta categoria.

CLASSE II: Máquina de médio porte, tipicamente motores elétricos de 15 kW a 75 kW, sem fundação

especial, motores rigidamente montados ou máquinas até 300 kW em fundação especial.

CLASSE III: Grandes acionadores principais e outras máquinas grandes, com massas rotativas montadas em fundações rígidas e pesadas, que são relativamente rígidos na direção de medida da vibração.

CLASSE IV: Turbomáquinas: Grandes acionadores principais e outras máquinas grandes com massa rotativa montada em fundação que são relativamente suaves na direção da medição da vibração (por exemplo turbo geradores, especialmente aqueles com subestrutura leve).

CLASSE V: Máquinas e sistemas mecânicos acionados com esforço de inércia desbalanceado, realizados por partes alternativas, montados em fundações que são relativamente rígidas na direção da medida da vibração.

CLASSE VI: Máquinas e sistemas mecânicos acionados com esforço de inércia desbalanceado realizado por partes alternativas, montados em fundações que são relativamente flexíveis na direção da medição da vibração, máquinas com massas rotativas acopladas com folgas, como eixo batedor em máquinas trituradoras, máquinas centrifugas com capacidade variável de desbalanceamento operando como unidades únicas sem componentes conectados, telas vibratórias, máquinas de teste dinâmico de fadiga, excitadores de vibração usados em plantas de processamento.

As primeiras quatro classes foram selecionadas porque existe um campo substancial de experiências nas quais se baseia sua avaliação. A tabela II de severidade apresenta uma ordem sugerida de faixas de qualidade de A até D. A Norma ISO 2372 e NBR 10082 indica que um aumento da ordem de 2,5 vezes (8 dB) no nível de vibração é uma alteração significativa no estado de funcionamento da máquina. Esse aumento corresponde à largura de uma faixa de qualidade. Por outro lado, é grave um aumento de 10 vezes (20 dB), pois a severidade da vibração da máquina pode passar para a classificação “não permissível”, faixa de qualidade D. Tem sido prática comum separar entre níveis de vibração medidos na direção horizontal e vertical em máquinas da Classe III. Em muitos casos, a tolerância para vibração na horizontal é o dobro da utilizada para vibrações na direção vertical. Máquinas com fundações relativamente leves são tratadas em categoria separada. Entretanto, o julgamento menos preciso para vibrações horizontais, mencionado nas classes III e IV, não parece ser justificado hoje em dia [11].

Máquinas nas Classes V e VI, especialmente motores alternativos, variam largamente em construção e em forças de inércia, conseqüentemente variam consideravelmente em suas vibrações características. Por esta razão, é difícil classificá-las do mesmo modo que as máquinas das quatro primeiras classes. Máquina com montagem rígida, da Classe VI, permitem tolerâncias maiores. As forças transmitidas pela montagem para o meio exterior são pequenas. Dentro destas circunstâncias, os níveis de vibração medidos do lado da máquina do sistema montado são maiores do que aqueles medidos

quando a máquina é presa em um suporte rígido relativamente grande [13].

TABELA II: Escala para avaliação da intensidade de vibração

faixas de severidade de vibração radial velocidade em rms na faixa de 10-1.000hz (limites de faixa)	Julgamento de qualidade para classes separadas de máquinas			
	Classe 1	Classe 2	Classe 3	Classe 4
mm/s				
0,28				
0,45	A			
0,71		A		
1,12			A	
1,8				A
2,8	B			
4,5		B		
7,1			B	
11,2		C		
18			C	
28		D		
45			D	
71				D

De acordo com as faixas, os níveis da tabela II são definidos:

Nível A: máquina em boas condições. Geralmente máquinas novas e ou reformadas.

Nível B: máquina em condições aceitáveis para operação.

Nível C: máquina em condições não aceitáveis para operação continuada. Necessita de intervenção programada.

Nível D: máquina sem condições de operação. Necessita de manutenção corretiva.

Vibrações com a mesma velocidade RMS em qualquer lugar na banda de frequência de 10Hz a 1000Hz, são geralmente consideradas como sendo de igual severidade [9]. A faixa de classificação da avaliação deve ter a relação de 1: 1,6, com variação de 4 dB entre os níveis de severidade. Para uma diferença de faixa de 4 dB, a velocidade cresce ou decresce, o que representa uma mudança significativa na resposta de vibração para a maioria das máquinas. Isto permite a construção de uma escala geral, que é independente e não restrita a um grupo de máquinas específicas. Disto se apreende que o termo severidade de vibração pode ser usado independentemente do julgamento de fatores individuais. De fato, ele pode ser

usado para construir qualquer classificação de avaliação desejada semelhante à tabela III. Possíveis diferenças em relação à avaliação por usuários e fabricantes podem geralmente ser evitadas se, antecipadamente, for acordada qualidade da medição desejada [13].

Tabela III: Faixa de severidade fixada pela norma NBR 10082

faixa de classificação	faixa de velocidade (RMS)	
	superior a	Até
0,11	0,071	0,112
0,18	0,112	0,18
0,28	0,18	0,28
0,45	0,28	0,45
0,71	0,45	0,71
1,12	0,71	1,12
1,8	1,12	1,8
2,8	1,8	2,8
4,5	2,8	4,5
7,1	4,5	7,1
11,2	7,1	11,2
18	11,2	18
28	18	28
45	28	45
71	45	71

III. MATERIAL E MÉTODOS

O procedimento experimental nesse trabalho propõe identificar vibrações mecânicas no conjunto de acionamento em exaustores industriais, disponibilizando os dados em rede com um servidor local. Com esses dados à manutenção passa a trabalhar de modo preditivo com intervenções somente programadas de menores períodos e menos impactos na produção.

A. Materiais

Foram utilizados sensores de vibração (acelerômetros) da marca Rockwell série 1443, instalados nas posições axial, vertical e horizontal nos mancais do eixo principal do exaustor e também nas tampas do motor principal para monitoração do estado dos rolamentos. No total foram usados oito sensores monitorados em dois módulos Dynamics 1444 também da marca Rockwell. A figura 8 mostra os sensores instalados no local.



Fig. 8: Sensores instalados nos mancais

Na figura 9 os sensores instalados nas tampas do motor, lado acoplado monitorando vertical e radial, e lado oposto somente radial.



Fig. 9: Sensores instalados no motor

B. Coleta dos dados

Os dados são coletados via módulo de interface da Rockwell Dynamics 1444. Este faz o tratamento das informações recebidas pelos sensores e envia os dados para o CLP via cabo ethernet, que se conecta em rede com o servidor através de um switch, podendo ser acessado remotamente de qualquer computador ou até mesmo de um *smartphone* conectado a rede *wifi* da fábrica. Na figura 10 um esquemático representando a interligação dos principais componentes do sistema.

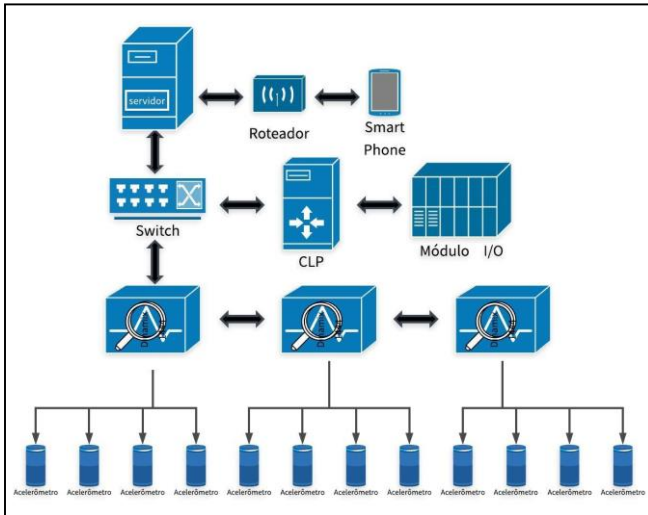


Fig. 10: Esquema do Sistema de Monitoração

C. Preparação da instalação

Um painel elétrico foi montado em paralelo ao painel original do exaustor com um CLP dedicado ao sistema para o tratamento dos dados coletados conforme figura 11. No mesmo conjunto os módulos I/O, switch, fonte de alimentação 24VDC e módulos Dynamics. Uma IHM *panel view 700* também foi usada para interface dos dados no setor de automação. Nela são representados os dados de medição de forma gráfica e numérica, onde se podem alternar os modos de visualização do motor ou dos mancais de acordo com a preferência do usuário.

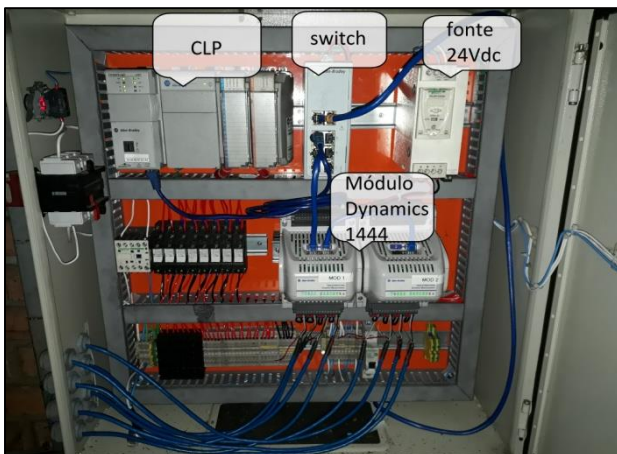


Fig. 11: Painel elétrico do sistema de monitoração

D. Definição do equipamento

O equipamento escolhido como protótipo foi o exaustor MFR-13191 marca Gema, modelo EAG1365I, que tem rotação de 900RPM, motor 90 KW de potência da marca Weg, modelo de mancal bipartido tipo Burger com rolamento SKF 22222 AEKAE4. O exaustor atende 35 equipamentos no setor de pré-prensas na fábrica de pastilhas da empresa Frás-le S/A. Este foi definido, pois é muito crítico para o setor. Uma parada deste equipamento

corresponde à perda produtiva muito elevada, pois sem a sua operação fica inviável o trabalho nas demais máquinas. Na figura 12 um exaustor similar.



Fig. 12: Exaustor filtro manga

E. Definição de alarmes

Os alarmes foram definidos de acordo com as normas técnicas e potência do exaustor. De acordo com suas características técnicas se classifica na classe 3 na faixa de severidade da Tabela II. Também se baseou em dados históricos do equipamento. As grandezas definidas para medição são: velocidade (mm/s) e aceleração (g). De acordo com os canais monitorados é possível a detecção dos principais defeitos ou problemas no sistema (conjunto motor e ventilador), tais como: gaiola, transmissão, desbalanço, alinhamento, baixas frequências, pista externa rolamento, pista interna rolamento e problema elétrico. A figura 13 mostra a tela de interface na IHM e supervisor.

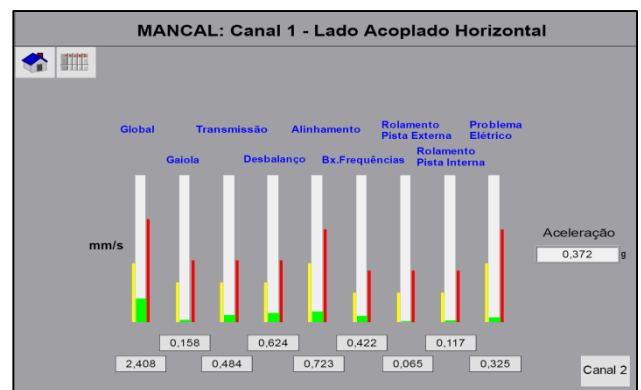


Fig. 13: Tela do canal 1 na IHM

IV. RESULTADOS

O sistema até então usado nas preventivas nesse equipamento eram feitas com um período definido. Ou seja, o técnico se deslocava periodicamente até o equipamento para coleta das informações com um coletor de dados manual modelo CMVA 60 do fabricante SKF. Esses dados eram descarregados no computador e

analisados pelo engenheiro usando o software @ptitude, também do fabricante SKF. Após análise dos gráficos os dados eram salvos em planilha Excel e comparados com o histórico pelo engenheiro responsável da área. Porém dentro desse intervalo não havia nenhum acompanhamento do estado de evolução, possibilitando quebras inesperadas e possíveis paradas dos outros equipamentos produtivos dependentes do exaustor.

Com base nisso, no sistema atual o acompanhamento é *full time*, além de a monitoração já definir os possíveis problemas em formas gráficas e numéricas. O técnico não precisa mais fazer o roteiro mensalmente, somente a lubrificação, disponibilizando mão de obra para outras atividades de manutenção.

O controle fica mais robusto, com análises estatísticas, relatórios customizados, sem depender do preenchimento manual em planilhas.

Os limites de alarmes foram estabelecidos de acordo com os limites já usados com o sistema anterior e no histórico do equipamento. Os níveis de referência foram definidos para, aceitável (cor verde), moderado (cor amarelo) e extremo (cor vermelho). Os níveis foram considerados de acordo com a potência da máquina, usando as normas NBR 10082 e ISO 20816-1 como base.

Também foram configuradas telas para uma visão global do equipamento, com os canais de monitoramento do mancal e do motor separadamente. E também telas individuais para cada canal, a figura 14 exemplifica o monitoramento nos quatro canais dos mancais.

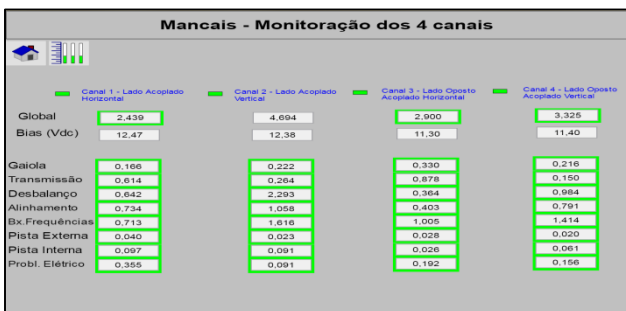


Fig. 14: Tela do IHM dos 4 canais dos mancais

Toda intervenção de manutenção tem como premissa uma ordem de manutenção gerada no sistema ERP (*Enterprise Resource Planning*) que integra todos os dados e processos da empresa em um único sistema, possibilitando o armazenamento dos dados. Logo a facilidade de extrair os históricos de manutenções em um equipamento fica facilitada.

A partir disso foi possível a comparação dos dados de quebras deste equipamento em dois períodos, um ano antes da implantação e um ano após o sistema estar implementado. Na tabela IV dados no período de um ano antes do projeto.

TABELA IV: Indicadores no período de 09/2016 a 09/2017

MFR-13191	MTTR	MTBF	C/ PARADA	DISP. MANUT.	CUSTOS TOTAIS
Ordem de Man.	5,8	93	5	98,84%	6990,68
21192390	1	514	1	99,80%	2471,69
21212009	2	446	1	99,60%	411,98
21218736	2,3	535	1	99,60%	418,43
21263288	12,8	475	1	97,40%	2154,95
21265639	10,9	476	1	97,80%	1533,63

Conforme a tabela nota-se que o equipamento teve cinco paradas no ano, que impactaram nos principais indicadores: disponibilidade, MTBF, MTTR e custo. O custo total se refere somente à mão de obra e peças do reparo, os tempos de MTTR e MTBF são medidos em horas num calendário de três turnos de trabalho.

Considerando os 35 equipamentos dependentes do exaustor com uma eficiência média de 75% a perda chega a 41.860 peças dia. Transformando em valores financeiros a perda poderá chegar a mais de R\$500.000,00/dia.

Após a implantação do projeto os dados são factíveis para expansão do projeto, conforme dados da tabela V.

Tabela V: Indicadores no período de 10/2017 a 09/2018

MFR-13191	MTTR	MTBF	C/ PARADA	DISP. MANUT.	CUSTOS TOTAIS
Ordem de Man.	0,5	487	0	99,90%	137,56
21481748	0,5	487	0	99,90%	137,56

Analisando a tabela observa-se que o equipamento não teve paradas no período, consequentemente não impactou na produção. A única ordem no sistema foi do tipo programada em função de desbalanceamento apontado pelo sistema de monitoração de vibração.

Com base no protótipo implantado foi possível eliminar manutenções corretivas no equipamento após implantação do sistema de monitoramento *online*. Durante o período desde a instalação do sistema foi possível identificar algumas alterações no balanço e alinhamento, o que pôde ser programado a interferência da manutenção com bastante antecedência, eliminando uma possível quebra.

Com uma atualização do sistema também foi possível disponibilizar os dados na plataforma Android e IOS, o que possibilita o acesso às telas de alarmes e monitoração em qualquer *smartphone* que esteja conectado a rede *wifi* da fábrica, apenas acessando o endereço IP do servidor.

V. CONCLUSÕES

Apesar de uma cultura crescente em manutenção preditiva nas indústrias brasileiras, percebe-se ainda uma carência de uma literatura mais abrangente e com detalhamento mais aprofundado no tema.

A maioria das literaturas se baseia no Valor Global de velocidade, o que dificulta na prática a monitoração em rolamentos de mancais devido a sua baixa massa se comparado com a carcaça de um equipamento. Por isso a importância de um histórico de medições.

No entanto, é notável que a análise de vibração consista numa das principais ferramentas para análise de condição de um equipamento. A possível antecipação de falhas eleva a manutenção num outro nível, podendo programar intervenções com mais efetividade, diminuindo tempo de reparo e custo.

As ferramentas que auxiliaram nesse trabalho como, Internet das Coisas, aproximam a empresa no ambiente da indústria 4.0. Isso beneficia o ambiente industrial, pois as pessoas certas são avisadas na hora adequada, com antecedência e os sintomas do equipamento são transmitidos com maior rapidez e fidelidade. A manutenção passa a coordenar melhor as necessidades produtivas com necessidades humanas e interligando com os demais departamentos, conseguindo oferecer soluções mais benéficas e vantajosas, aumentando o nível de eficiência.

Ainda há a possibilidade de expansão do projeto usando os mesmos módulos *Dynamics*, somente usando a multiplexação dos sinais dos acelerômetros. Essa solução permite ainda uma redução de custos na implementação de projetos futuros, o que determinou a escolha do modelo de equipamento usado.

Portanto, o maior motivo pela adoção da manutenção preditiva é o econômico, pois agrega alguns resultados como: eliminação de desperdício de peças, diminuição de estoques associados, aumento da eficiência nos reparos, aumento da confiabilidade da planta, diminuição da gravidade dos problemas. Como consequência são alcançados resultados secundários mais abrangentes que são: confiabilidade, custos globais menores, aumento da produtividade, melhoria na qualidade da manutenção e segurança dos manutentores.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a empresa Fras-le pela disponibilidade dos recursos e pela oportunidade da implantação do projeto deste trabalho. Também agradecemos o professor Elton Fabro da Universidade de Caxias do Sul pela sua disponibilidade e orientação.

VI. BIBLIOGRAFIA

- [1] Haroldo Ribeiro, “Desmistificando o TPM”, PDCA Editora, 1ª edição, São Caetano do Sul, 2010.
- [2] Iony Patriota de Siqueira, “Manutenção centrada na confiabilidade” Rio de Janeiro: qualitymark Editora, 3ª edição, 2014.

- [3] Alan Kardec Pinto, Julio Aquino Nascif Xaxier, “Manutenção função estratégica”, qualitymark editora, 2010.
- [4] E. L. Nunes, “Saberes da Manutenção: uma visão sistêmica”, editora: UFPR, Paraná, 2015.
- [5] L. C. Nepomuceno, “Técnicas de Manutenção Preditiva”, editora Edgard Blucher, São Paulo, 2012. pp 41 – 42.
- [6] Associação das Normas Técnicas, NBR 5462, “Confiabilidade e manutenibilidade”, ABNT, Rio de Janeiro, 1994.
- [7] M. P. NORTON, “*Fundamentals of noise and vibration analysis for engineers*”. 2 edição. Cambridge, Cambridge University Press, 1994.
- [8] J. C. FERNANDES, “Segurança nas vibrações sobre o corpo humano”. Disponível em: < www.feb.unesp.br/jcandido/vib/Apostila.doc >. Acesso em: 15 out de 2018.
- [9] Internacional Organization for Standardization, *ISO 10806-1, Mechanical vibration - Evaluation of machine vibration by measurements on non-rotating parts-Part 1: General guidelines*, ISO, Suíça, 1995.
- [10] Associação das Normas Técnicas, NBR 10082, “Análise de vibração mecânica de máquinas com velocidades de operação de 600 a 15000 RPM-bases para especificação e padrões de avaliação”, ABNT, Rio de Janeiro, 2011.
- [11] Internacional Organization for Standardization, *ISO 2372, Mechanical vibration of machines with operating speeds from 10 to 200 rev/s -Basis for specifying evaluation standards*, ISO, Suíça, 1974.
- [12] M.T. de ALMEIDA, “Vibrações mecânicas para engenheiros”, 2ª edição, Editora Edgard Blücher, São Paulo, 1990.
- [13] Internacional Organization for Standardization, *ISO 20806-1, Mechanical vibration -Measurement and evaluation of machine vibration-- Part 1: General guidelines*, ISO, Suíça, 2016.
- [14] Gil Branco Filho “Indicadores e índices de manutenção”, Ciência Moderna editor, 1ª edição, Rio de Janeiro, 2006.

Luciano Baldissarelli é graduado em Tecnólogo em Automação (2016) pela Universidade de Caxias do Sul (UCS, Caxias do Sul-RS). Seus principais interesses de pesquisa incluem manutenção industrial.