

USO DAS ASSINATURAS ELETRICAS E HIDRODINÂMICAS DE SISTEMAS DE CONVERSÃO ELETROMECAÂNICA DE ENERGIA PARA MELHORAR A MANUTENÇÃO E AUMENTAR A SUA EFICIÊNCIA

J.L.Bozzetto e F.C.Bianchi

BCM Engenharia

***Resumo** – Este artigo apresenta os conceitos básicos relacionados à análise de vibração em sistemas mecânicos e o conceito de assinatura de vibração como forma de apoio à manutenção. Descreve um sistema de inteligência progressiva para a percepção, medição e análise da assinatura da vibração de máquinas girantes e oscilatórias tais como turbinas, geradores, sistemas de bombeamento e outras. Procura mostrar como a análise das assinaturas elétricas e hidrodinâmicas de máquinas girantes podem auxiliar na manutenção destes sistemas e na busca da máxima eficiência no seu uso. Através desta análise é possível perceber comportamentos com potencial de provocar defeitos, tais como desgastes, desbalanceamentos, cavitação e outros que venham a alterar a assinatura considerada dentro da normalidade.*

***Palavras chave:** Vibração – Manutenção – Assinatura – Preditiva – IOT – Eficiência – Confiabilidade*

USE OF ELECTRICAL AND HYDRODYNAMIC SIGNATURES OF ELECTROMECHANICAL ENERGY CONVERSION SYSTEMS TO IMPROVE MAINTENANCE AND ENHANCE THEIR EFFICIENCY

***Abstract** – This article presents the basic concepts related to vibration analysis in mechanical systems and the concept of vibration signature as a way to support maintenance. Describes a progressive intelligence system for the perception, measurement and analysis of vibration signature of rotating and oscillating machines such as turbines, generators, pumping systems and others. It tries to show how the analysis of the electrical and hydrodynamic signatures of spinning machines can help in the maintenance of these systems and in the search of the maximum efficiency in its use. Through this analysis it is possible to perceive behaviors with potential to cause defects, such as wear, imbalance, cavitation and other defects that may change the signature in relation to that considered normal.*

***Keywords:** Vibration - Maintenance - Signature - Predictive - IOT - Efficiency – Reliability*

1 INTRODUÇÃO

Todas as máquinas elétricas rotativas, tais como conjuntos turbina-geradores, motores, sistemas de bombeamento, e outras apresentam características específicas de vibração mecânica e de fluxo de energia elétrica quando de seu funcionamento. Estas características que são singulares, mapeadas nas diversas situações de operação constituem as chamadas assinaturas destas máquinas. A análise destas assinaturas podem fornecer informações valiosas sobre os estado dos diversos elementos das máquinas.

Assim como diversos profissionais utilizam o ouvido para diagnosticar problemas, mecânicos, médicos, pilotos entre outros, as distorções percebidas na vibração das máquinas são sintomas de diversas situações, tais como desgastes ou degenerações de rolamentos, de mancais, falhas no isolamento de enrolamentos entre muitos outros potenciais problemas. A assinatura, quando utilizada para a análise de vibração permite monitorar e registrar o nível de vibração mecânica em máquinas ou outras estruturas usando sensores acoplados. Através desse registro é possível automatizar a percepção do status e de falhas no funcionamento em partes móveis tais como motores, mancais, suportes, etc. Os registros tabulados em oscilografias e dados estatísticos recolhidos durante ensaios controlados e durante a operação normal permitem que se desenvolva algoritmos para reconhecimento de padrões e através destes a detecção das falhas, baseado na intensidade, frequência, conteúdo harmônico e duração das vibrações observadas. Isso permite, minimizar os efeitos danosos de defeitos ainda incipientes, antecipando ou procedendo a manutenção.

2 GLOSSÁRIO E DEFINIÇÕES

Assinatura: Marca ou característica específica de algo ou alguém. No caso em estudo, significa o conjunto de informações que caracterizam o comportamento de um objeto em determinadas circunstâncias. Como exemplo destas informações, podemos citar as características de vibração, de uso de energia, perfil de temperaturas etc. Uma analogia adequada para esse significado de assinatura é o timbre de uma voz ou instrumento.

Análise de Vibração: é o processo de monitoração e análise das características de vibração de determinado elemento, buscando perceber alterações destas características e correlacionando-as com potenciais anomalias. Todo objeto em movimento apresenta vibrações caracterizadas por sua amplitude, intensidade e frequências componentes.

Big Data: O termo *Big Data* refere-se a um grande conjunto de dados gerados e armazenados, associado às tecnologias desenvolvidas para extrair e gerar valor desse caos de dados. Seu surgimento está relacionado com o aumento exponencial da quantidade de dados gerados a cada minuto no mundo. O Big Data representa uma nova era na sociedade moderna, em que os dados se tornam cada vez mais valiosos, mudando a forma como a economia e a ciência observam os processos, tendo em vista aumentar a produtividade, reduzir custos e tomar decisões mais inteligentes. No que tange a ciência, o surgimento do *Big Data* representou a criação de um novo paradigma - um novo método de avançar as fronteiras do conhecimento por meio de novas tecnologias para coletar, manipular, analisar e exibir dados, construindo valor agregado com as análises geradas.

FFT: Abreviatura para Fast Fourier Transform. Algoritmo matemático resultante de um caso especial da transformada de Fourier, usada para converter sinais do domínio tempo para o domínio frequência, isto é, extrair os diversos componentes de frequência de um sinal complexo.

Manutenção Preditiva: É o acompanhamento periódico dos equipamentos baseado na análise de dados coletados através de monitoração ou inspeções em campo. O objetivo principal da manutenção preditiva é a verificação pontual do funcionamento dos

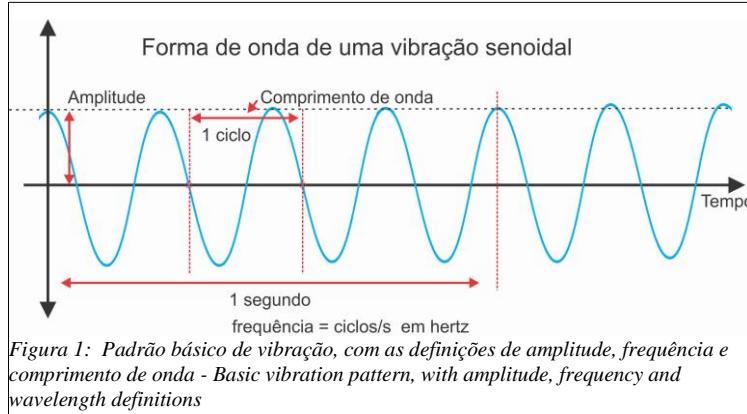
equipamentos, antecipando eventuais problemas que possam causar gastos maiores com a manutenção corretiva. A manutenção preditiva é conhecida como uma técnica de manutenção com base no estado do equipamento. Tenta definir o estado futuro do equipamento e o tempo de sua durabilidade. Tem base na medição e coleta de dados por monitoração: **vibração**, análises de óleo, ultrassom, termografia, entre outras técnicas.

Perceptores de vibração: Perceptores são elementos que contém um ou mais sensores integrados a um sistema computacional em tempo real parametrizável e programável, com capacidade de armazenamento de informações, sincronismo de tempo, capacidade de ativar e desativar cargas tais como alarmes locais e comunicação com instâncias hierarquicamente superiores, iguais ou inferiores .

Timbre: Um dos significados da palavra timbre é originária do francês e significa carimbo ou marca. Na música, timbre tem esse sentido de marca, pois caracteriza o som de um instrumento ou voz ainda que esteja emitindo a nota na mesma frequência de outro. É o que diferencia dois sons de mesma frequência (mesma nota). Por exemplo, a nota Dó tocada no violão tem um som muito diferente da nota Dó tocada no teclado ou na flauta, evidenciando que esses instrumentos possuem timbres diferentes.

3 SISTEMAS COM PARTES MÓVEIS E ANÁLISE DE VIBRAÇÕES

3.1 Considerações gerais



Todos os sistemas com partes móveis apresentam vibrações, causadas pela interação de forças internas com as massas dos diversos componentes. Estas vibrações podem ser percebidas e descritas em termos de deslocamento, velocidade ou aceleração das diversas partes. Um sistema básico ideal composto por uma massa, um elemento elástico e um amortecimento, gera um padrão básico de oscilação senoidal quando submetido a uma força inicial. A figura a seguir mostra o padrão de vibração representado através de um gráfico de deslocamento X tempo:

As oscilações percebidas nos sistemas reais são uma combinação das influências dos diversos elementos que compõe este sistema. Cada um destes elementos produzindo uma oscilação natural deste tipo, gera um padrão complexo resultante da soma da contribuição de todos os elementos, cada qual com sua amplitude, frequência, fase e amortecimento característicos.

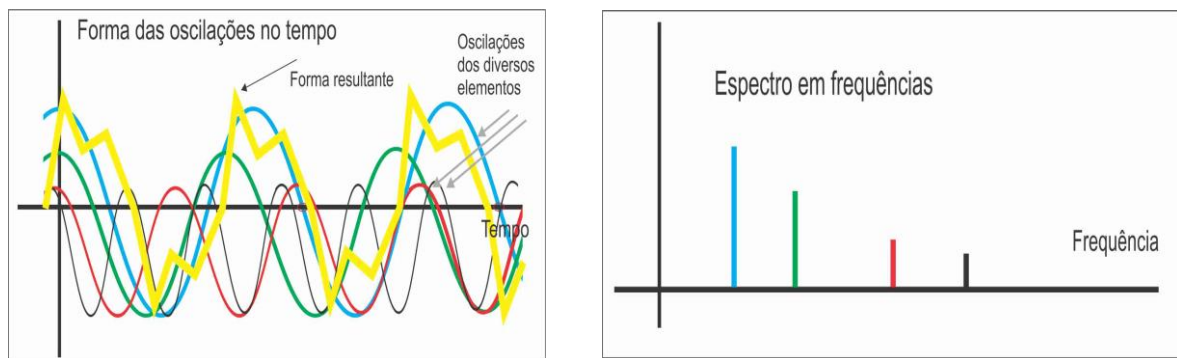


Fig.2. Sinal real típico de uma medida de vibração nos domínios tempo e frequência - Real signal typical of a measure of vibration in time and frequency domains

O processo de coleta das informações de vibração através de sensores pode fazer leituras de deslocamento, velocidade ou aceleração de determinadas partes da máquina. A quantificação desses valores no domínio tempo ou no domínio frequência permite quantificar as amplitudes média e máxima, as frequências componentes desse sinal e a evolução destes ao longo do tempo. A análise desses valores permite que se faça um diagnóstico do funcionamento do sistema a partir desses padrões, uma vez que se conheça o padrão de funcionamento normal e os padrões característicos resultantes dos diversos modos de falha do sistema. Como exemplo do potencial desta técnica, a monitoração de vibração em motores permite a detecção de um grande número de condições de operação e anormalidades – entre outros:

- Equipamento ligado ou desligado
- Rotação real do motor
- Partes girantes desbalanceadas
- Eixos e acoplamentos desalinhados
- Folgas em rolamentos
- Contato indevido entre partes girantes e fixas
- Falhas de lubrificação

3.2 Normas envolvidas

O processo de aquisição e análise de vibrações em máquinas é objeto de uma série de normas, destinadas a padronizar a nomenclatura, níveis aceitáveis e formas de medição. Entre outras, podem ser destacadas:

- ABNT NBR 10082: Regras para avaliação do estado de funcionamento de máquinas rotativas.
- ABNT NBR 15928: Terminologia empregada em vibrações mecânicas, choques e monitoramento de máquinas.
- ISO 10816: Avaliação da vibração de máquinas através de monitoramento de partes não rotativas.
- ISO 7919: Avaliação da vibração de máquinas através de monitoramento de partes rotativas.

4 ASSINATURAS DE VIBRAÇÃO EM SISTEMAS COM PARTES MÓVEIS

A assinatura de vibração de um sistema pode ser entendida como uma marca ou característica de um determinado sistema em uma condição operacional bem específica. Uma analogia simples para o conceito de assinatura é o timbre de um instrumento musical. Cada instrumento produz um som com um timbre característico, que permite que qualquer pessoa reconheça o instrumento. Além disso, a variação de condições externas e a comparação de dois instrumentos de mesmo tipo apresentam pequenas diferenças que podem ser notadas. O mesmo ocorre com um bom mecânico que, ouvindo os ruídos de um motor, consegue diagnosticar problemas. Este mesmo conceito é explorado na análise de vibração, focado agora na monitoração de máquinas através do uso de sensores e algoritmos computacionais para caracterização da assinatura e a partir dessa assinatura, a determinação de condições normais ou anormais do sistema.

4.1 Discriminação de frequências e amplitudes

Conforme citado no item 3.1, as leituras de vibração medidas no sistema são resultantes de uma soma de inúmeros componentes senoidais básicos. A partir de uma amostra de n leituras, podem ser obtidas imediatamente algumas grandezas através de cálculos básicos: amplitude máxima, amplitude média, amplitude RMS, etc.

Para separar os diversos componentes senoidais básicos, é usada a transformada de Fourier, gerando o chamado Diagrama no Domínio Frequência. Os sensores utilizam o algoritmo FFT (Fast Fourier Transform), o que gera uma tabela com as amplitudes de vibração detetadas em cada frequência.

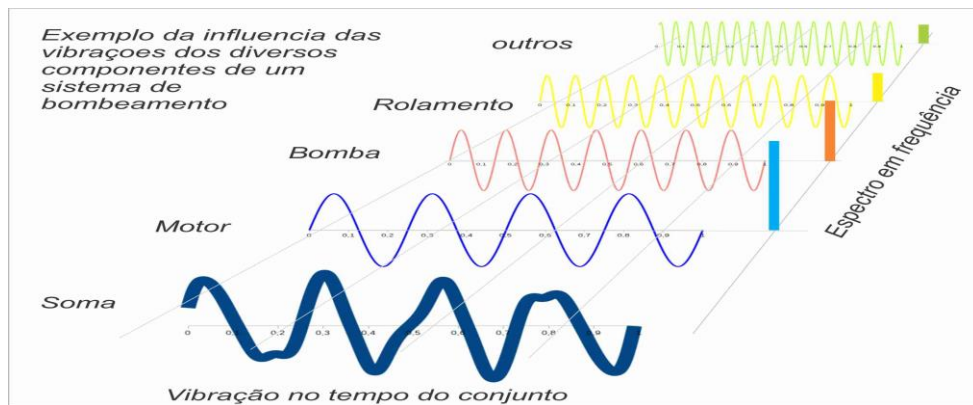


Figura 3: Diagrama tridimensional mostrando simultaneamente os domínios tempo e frequência - Three-dimensional diagram showing time and frequency domains simultaneously

No processo de análise de vibração, a assinatura do sistema será o vetor composto pelas grandezas básicas, mais a tabela de amplitudes para cada frequência.

4.2 Determinação da normalidade

As normas citadas no item 3.2 descrevem como e onde os sensores devem ser instalados, orientam sobre a interpretação dos resultados e, em alguns casos, como os fabricantes podem informar previamente os padrões de vibração esperados para cada equipamento. A partir dessas informações, ensaios são realizados em diversas condições operacionais com a finalidade de registrar as assinaturas consideradas “normais”. Quando o sistema entra em

regime de operação, o equipamento de coleta e análise passa a comparar a assinatura de vibração corrente com esses padrões.

4.3 Detecção de anormalidades

Quando os algoritmos de análise percebem uma discrepância significativa entre o padrão considerado normal e a assinatura de vibração corrente do equipamento, isso irá caracterizar a detecção de uma anormalidade, possivelmente oriunda de uma falha. Conforme a natureza e amplitude da discrepância, importantes informações podem ser obtidas, agrupadas em:

- Modo de falha
- Gravidade da falha

O modo de falha se refere a qual parte do sistema causa o problema. Para máquinas rotativas existem estudos teóricos sobre como falhas tais como rolamentos defeituosos, acoplamentos desalinhados, mancais soltos, etc... afetam de maneiras distintas a assinatura de vibração. Além das informações de estudos prévios feitos pelo fabricante da máquina, ao longo da vida útil do equipamento existe a experiência acumulada pelo usuário, oriunda dos eventos ocorridos neste e em outros similares. Para o processo de manutenção, essa informação se torna muito relevante, evitando desmontagens, substituição de peças e inspeções mecânicas desnecessárias.

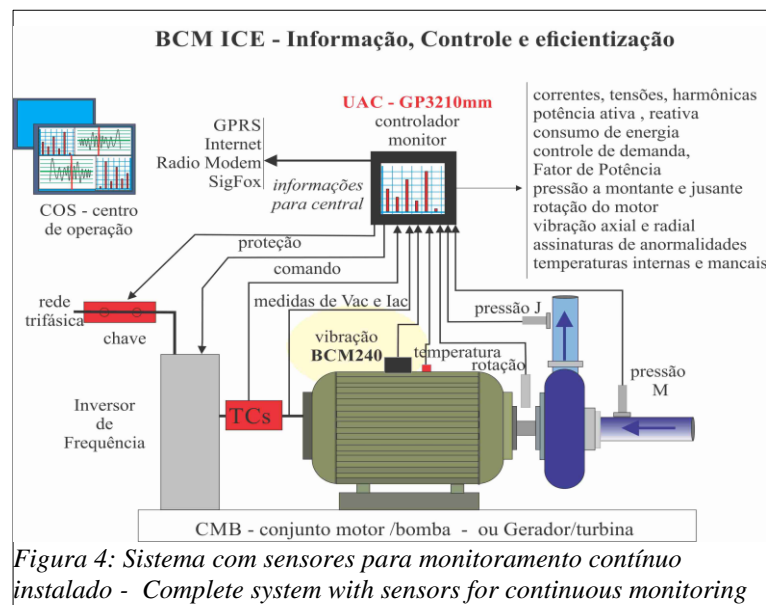
A informação sobre a gravidade da falha também é muito importante para o processo de manutenção. Dentro do conceito de Manutenção Preditiva, a análise das assinaturas permite acompanhar o desgaste das partes ao longo do tempo, permitindo uma melhor estimativa de quando uma substituição será necessária. Também na ocorrência de uma falha, torna-se possível estimar a urgência requerida do atendimento para manutenção.

5 EQUIPAMENTOS E SENSORES

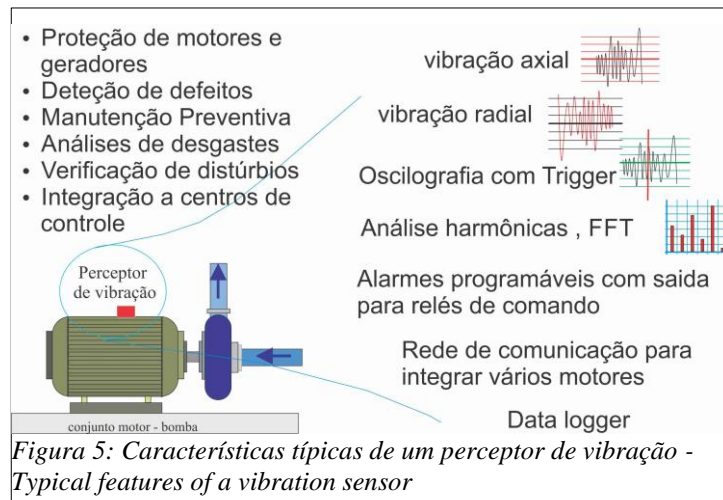
A medição de vibração nas máquinas é feita através de dois tipos básicos de sensores:

- Sondas de deslocamento medem a variação da distância entre a sua base de referência e o ponto de interesse, sem contato. A medição é unidimensional.
- Sondas de aceleração medem a aceleração do próprio sensor, que deve estar solidamente fixado ao ponto de interesse. A medição é feita simultaneamente em três dimensões (X,Y,Z), usando um único sensor.

Quanto ao tipo de monitoramento, este pode ser temporário ou contínuo. A opção por uma ou outra estratégia depende da criticidade do sistema e das consequências de uma falha em termos de segurança, tempo de produção perdido e custo para reparo. Devido a crescente capacidade e sofisticação dos sensores e recursos de processamento associados, acompanhado de um custo decrescente dos produtos envolvidos, cada vez mais se justifica a implementação de um monitoramento contínuo da vibração, mesmo em sistemas de pequeno e médio porte.



Perceptores de vibração baseados em sensores de aceleração e com processamento embarcado fazem a medição tridimensional, com pré-processamento das medidas, disponibilizando valores médios, contagem de picos, oscilografia e saídas de alarme, numa montagem robusta e de baixo custo.



6 PROCESSO DE COLETA, ANÁLISE E DIAGNÓSTICO

O resultado final do sistema de monitoração é um conjunto de informações consolidadas que mostra o desempenho da máquina, uma orientação consistente para o processo de manutenção preditiva e também alarmes correspondentes a falhas merecedoras de atenção urgente. A estrutura usada para implementar esse processo está representada no diagrama abaixo:

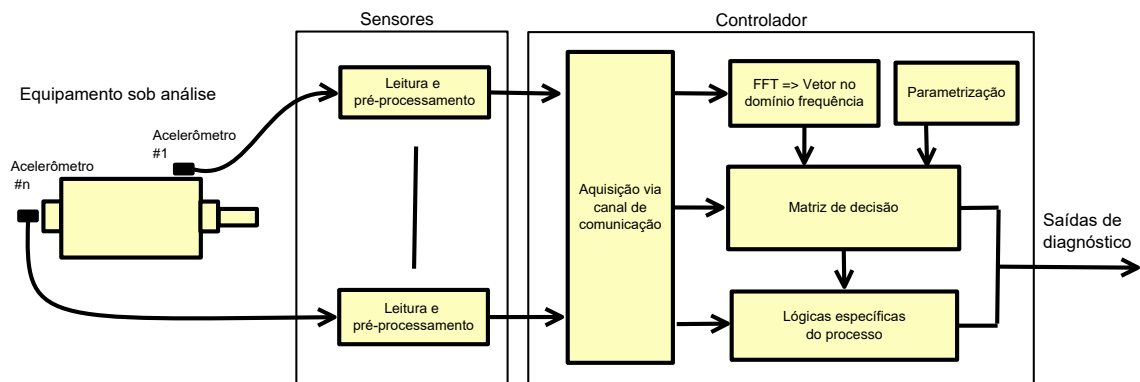


Figura 6: Diagrama de blocos do processo de coleta, análise e diagnóstico - Block diagram of the acquisition, analysis and diagnosis process

O primeiro aspecto importante do processo de coleta de informações de vibração é a localização e instalação adequada dos sensores. Ao contrário de outras medições físicas, feitas de forma mais direta, estável e repetível, o que o sensor de vibração lê não é, por exemplo, a vibração de um eixo desbalanceado ou desalinhado, mas sim o reflexo dessa vibração sobre a estrutura na qual o sensor está fixado. Portanto, a leitura do sensor irá incluir uma série de fatores dependentes da mistura de diversas fontes de vibração, ressonâncias, posição e rigidez do acomplamento do sensor, etc.

A escolha da posição onde instalar os sensores é uma preocupação descrita em diversos pontos das normas citadas em 3.2. Como preceitos gerais, devem ser escolhidos pontos da máquina acessíveis o mais próximos possível dos locais onde as vibrações se originam – carcaça, mancais, suportes, etc.

Sensores inteligentes fazem, além da medida de vibração propriamente dita, um pré-processamento das informações. As leituras são feitas para os eixos X, Y e Z numa taxa que depende da aplicação, mas que pode chegar até 20.000 amostras por segundo. De forma simultânea com a coleta, o sensor já calcula níveis médios, níveis de pico, alarmes de alta velocidade para condições extremas e vetores para oscilografia.

Um controlador local recebe os sinais de diversos sensores instalados no sistema e executa as funções de análise. Recebendo o conjunto de medidas e implementando algoritmos FFT em tempo real, disponibiliza um conjunto de variáveis representativo do comportamento do sistema. Comparando este padrão com os padrões de vibração esperados (“baseline”) para o funcionamento normal e com os padrões característicos de diversos modos de falha, pode ser apresentado um diagnóstico de funcionamento que será valioso para o processo de manutenção.

Os padrões característicos dos modos de falha podem ser determinados de forma teórica ou prática para cada tipo de sistema. Registros históricos de eventos de falhas fornecem essas informações práticas. Por outro lado, existem diversos estudos teóricos que permitem prever os padrões de vibração – componentes de frequência e amplitude, em máquinas rotativas submetidas a situações de mancais defeituosos, rolamentos danificados, cavitação em bombas, etc...

Com a flexibilidade de permitir a inclusão de lógicas adicionais customizadas para cada aplicação, os controladores, usando linguagens padronizadas de automação são programados para incluir algoritmos adicionais de detecção de falhas – relacionando de forma muito particular para determinado sistema – comparando informações de diversos sensores, incluindo também informações vindas do controlador do processo.

Um exemplo simples de estabelecer a correlação entre valores produzidos pelos sensores de vibração é o uso de matrizes para produzir diagnósticos.

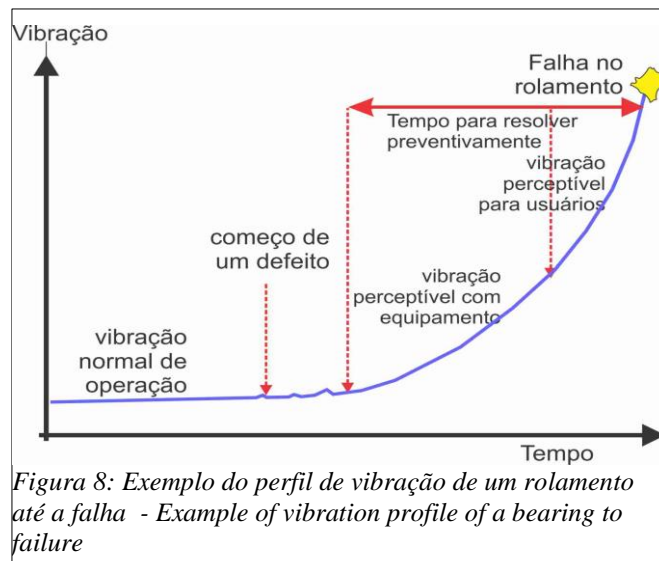
The figure shows a 5x5 decision matrix. The horizontal axis is labeled 'CPICOf' with an arrow pointing right, and the vertical axis is labeled 'SOMAn' with an arrow pointing down. The columns are numbered (1) through (5) and labeled 'MXAX()' at the top right. The rows are numbered (1) through (5) and labeled 'MXAY()' at the bottom left. The matrix cells contain the following values:

| | (1) | (2) | (3) | (4) | (5) |
|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| (1) | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| (2) | 2 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| (3) | 3 | 3 | 3 | 4 | 5 |
| (4) | 4 | 4 | 4 | 4 | 5 |
| (5) | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 |

Figura 7: Matriz de decisão com duas variáveis - Decision matrix with two variables

Nesse exemplo simples, a contagem de picos de aceleração aparece no eixo X; a leitura média de vibração aparece no eixo Y. Com base nos valores parametrizados para cada célula, em cada eixo, o controlador calcula as correlações e entrega um índice característico de desempenho, na faixa 0 a 5.

O índice característico de desempenho está relacionado diretamente com a ação exigida do processo de manutenção. Um valor pode indicar máquina parada, outro indica operação normal, outros indicam o tipo de problema que está ocorrendo e a urgência requerida para uma intervenção. É importante notar que, do ponto de vista da manutenção, o sistema de detecção e análise é tão mais valioso quanto maior for a antecipação de um alerta em relação à parada da máquina em função de uma quebra.



A capacidade de processamento local dos sensores e a flexibilidade oferecida pelos controladores permite ainda que o histórico das análises produzidas, combinado com o resultado das intervenções de manutenção viabilize um processo de melhoria contínua no sistema, através da reparametrização, inclusão e modificação das lógicas de análise, permitindo a produção de resultados cada vez mais confiáveis e precisos. Usando ainda os recursos analíticos de “Big Data” é possível estender a análise para abranger uma grande massa de dados históricos de desempenho e intervenção em outras máquina similares, localizadas em outras plantas.

7 CONCLUSÕES

A maioria das máquinas possui peças móveis, em muitos casos peças rotativas. Medir como essas partes vibram pode dizer muito sobre a saúde de uma máquina. O objetivo e a ciência de medir e interpretar os ruídos e oscilações reveladoras - a análise de vibrações em máquinas rotativas existe há décadas. Esta tecnologia ganhou popularidade ao longo do tempo porque inúmeros modos de falha podem ser identificados sem parar ou abrir a máquina. Desenvolvimentos recentes em sensores baseados em semicondutores, aquisição de dados,

processadores e tecnologias de análise, estão tornando a análise de vibração mais barata, mais fácil e mais amplamente disponível.

A análise de vibração é um componente crítico de um sistema de manutenção. Em oposição à estratégia de "deixar funcionando até falhar...", essa abordagem acompanha em tempo real o perfil típico de vibração da máquina. Analisando os padrões e amplitudes dos picos de vibração em frequências específicas, regras e algoritmos podem ser desenvolvidos para diagnosticar problemas. Não só falhas que exigem uma parada imediata, como também sinais de falhas e desgastes que ajudam a planejar as tarefas de manutenção, dentro de um conceito de manutenção preditiva. Entre as falhas mecânicas mais importantes que a análise de vibração pode revelar estão o desbalancamento de partes rotativas, desalinhamento de eixos, folgas, desgaste de correias, rolamentos, etc . Alinhado com os conceitos da Internet das Coisas (IoT), as informações adquiridas constituem uma massa de informações que, processadas num controlador local ou numa central, acrescentam um grande valor às atividades de projeto das máquinas, manutenção e gerenciamento dos processos produtivos. Os resultados são extremamente promissoras. O aumento na eficiência dos processos baixa os custos e aumenta a competitividade na geração e uso da energia, e a manutenção mais precisa resulta em menores tempos de máquina parada e custos menores de manutenção.

8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] A.Kumar, "Using condition-based maintenance to optimize smart manufacturing operations", Revista Control Engineering mar/2018, pg.12.
- [2] D.Ford, "IoT Analytics: Cloud or Edge" - Webinar apresentado em jun/2018.
- [3] S.Mackay, "Practical Machinery Vibration Analysis & Predictive Maintenance", Engineering Institute of Technology, IDC Technologies
- [4] M.Mathias, "Ferramentas de Diagnóstico de Máquinas, Unesp, Programa de pós-graduação em mecânica
- [5] International Standard ISO10816-3 – Mechanical Vibration – Evaluation of machine vibration by measurements on non-rotating parts, ISO, 1998