

## Aumento de disponibilidade de máquina onduladeira com manutenção preditiva através de sensores inteligentes, computação em nuvem e conceitos da indústria 4.0

Gilmar Antonio Adada Junior (UTFPR - Universidade Tecnológica Federal do Paraná) adadajr@gmail.com

Marcelo Vasconcelos Carvalho, (UTFPR - Universidade Tecnológica Federal do Paraná) marcelovc@gmail.com

**Resumo:** O setor de produção de embalagens de papelão ondulado tem sido cada vez mais exigido quanto ao desempenho de seus produtos e processos devido o avanço cada vez maior das tecnologias na gestão do processo de seus clientes, que exigem maior assertividade dos prazos de entrega e cada vez mais processos de fabricação com indicadores de alta confiabilidade nas fábricas, principalmente no que se refere a disponibilidade dos ativos. Com o objetivo de aumentar a disponibilidade de uma máquina, o experimento neste trabalho propõe utilizar ferramentas e conceitos da indústria 4.0 para monitorar em tempo real a vibração e temperatura de um componente da máquina onduladeira, disponibilizando os dados em nuvem através de sensores inteligentes conectados à internet, possibilitando um monitoramento e análise em tempo real com *dashboard* web e também com dispositivos mobile (*smartphone e tablet*) possibilitando que a manutenção possa atuar de forma preditiva, aumentando indicadores de desempenho e a confiabilidade do equipamento.

**Palavras chave:** Indústria 4.0, Dados em Nuvem, Sensores Inteligentes, Manutenção, Disponibilidade, Máquina Onduladeira, Papelão Ondulado

## Predictive maintenance in corrugated machine availability improvement with smart sensors, cloud computing and industry 4.0 concepts

**Abstract:** The corrugated cardboard packaging production sector has been increasingly demanded in terms of the performance of its products and processes due to the advancement of technologies in the process management of its customers, which demand shorter deadlines and greater assertiveness regarding the deadlines delivery, demanding manufacturing processes with indicators of greater reliability in packaging factories, especially regarding the availability of assets. In order to increase the availability of a machine or to experiment in this paper proposes to use industry 4.0 tools and concepts to monitor the vibration and temperature of a corrugating machine component online, making cloud data available through smart sensors connected to the internet, enabling online monitoring with web dashboard and also with mobile devices (smartphone and tablet) allowing that maintenance can act predictively, increasing performance indicators and equipment reliability.

**Key-words:** Industry 4.0, Cloud computing, Smart Sensor, Maintenance, Availability, Corrugated Machine, Corrugated Paper

### 1. Introdução

O setor de produção de embalagens de papelão ondulado tem sido cada vez mais exigido quanto ao desempenho de seus produtos e processos devido o avanço cada vez maior das tecnologias na gestão de processo em seus clientes, que exigem maior assertividade quanto aos prazos de entrega e cada vez mais processos de fabricação com indicadores de maior confiabilidade, principalmente quanto a disponibilidade dos ativos.

Uma das formas de aumentar a confiabilidade e disponibilidade de ativos é a utilização de técnicas e tecnologias de manutenção preditiva.

Com o advento das tecnologias da indústria 4.0 como sensores inteligentes, internet das coisas, computação e armazenamento em nuvem dentre outros conceitos, é possível unir estas tecnologias a favor da melhoria dos indicadores de desempenho de uma indústria de papelão ondulado.

Este trabalho experimental foi realizado em uma empresa de embalagem de papelão ondulado de grande porte com uma unidade situada na região do planalto sul paranaense e aborda a implementação de um sistema experimental de manutenção preditiva com a utilização de sensores inteligentes, interligados por conexão sem fio a uma nuvem de armazenamento e processamento de dados, sendo exibidos em dispositivos tanto fixo quanto móveis interligados a internet, possibilitando o monitoramento e análise *online* com *dashboard web* e também com dispositivos *mobile (smartphone e tablet)* possibilitando que a manutenção possa atuar de forma preditiva, aumentando indicadores de desempenho e a confiabilidade do equipamento.

## 2. Referencial teórico

### 2.1 Papelão Ondulado

A embalagem tornou-se ferramenta crucial para atender à sociedade em suas necessidades de alimentação, saúde, conveniência, disponibilizando produtos com segurança e informação para o bem-estar das pessoas, possibilitando a acessibilidade a produtos frágeis, perecíveis, de alto ou baixo valor agregado. (SILVA, 2013)

Segundo ABPO (2013) a história do papelão ondulado já passa de um século. Teve sua invenção sob a demanda crescente de embalar e proteger produtos. Desde a sua invenção, o papel sofreu mudanças consideráveis, mas o princípio de fabricação permanece o mesmo, mudando a tecnologia e os processos produtivos (SILVA, 2013).

A produção de embalagem de papelão ondulado tem mostrado enorme crescimento, acompanhando a revolução industrial e atendendo à demanda de embalagens de transporte, fazendo com que a produção de papelão siga a atividade econômica lado a lado (SILVA, 2013).

#### 2.1.2 Máquina Onduladeira

Historicamente, a primeira onduladeira conhecida foi projetada por Jefferson T. Ferres, da empresa Sefton Manufacturing Co., em 1895 (PRESSANTE, 2004). Este equipamento é primordial dentro de uma fábrica de embalagem de papelão ondulado, porque é a máquina que produz o principal produto dessa indústria, as chapas de papelão ondulado, as quais posteriormente passarão nas máquinas conversoras, agregando ao material a impressão, cortes e colagem. A chapa de papelão é formada por um ou mais elementos ondulados (miolo), onde são fixados a um ou mais elementos planos (capas), por meio de uma cola adesiva aplicado no topo das ondas (ROBERT, 2007).

A máquina é dividida em seis sublocais: Cabeçotes corrugadores, unidade de colagem, forradeira, vincadeira, facão e empilhadores. As divisões são feitas a partir da função de cada seção para formação do produto.



Figura 1 – Visão panorâmica - exemplo de uma máquina ondulateira (BHS, 2019)

## 2.2 Indústria 4.0

O termo "Indústria 4.0" nomeada assim para representar a quarta revolução industrial, essa que diferente das três primeiras revoluções, não se baseia apenas em uma tecnologia, mas sim na junção e conexão de várias ferramentas tecnológicas para gerar resultados muito mais abrangentes e reais, do que aqueles gerados por tecnologias anteriores e isoladas. Pois esta revolução também tem como impulsionador a era do compartilhamento, conectando máquinas e equipamentos.

Quando dizemos que a internet está na indústria, no meio produtivo, devemos pensar num ambiente onde todos os equipamentos e máquinas estão conectadas em redes e disponibilizando informações de forma única, esse conceito é chamado de Internet das Coisas (*IoT – Internet of Things*) (LEE et al., 2015). Conceito este que é um dos principais pilares desta quarta revolução industrial.

### 2.2.1 Internet das coisas e computação em nuvem

Do inglês *Internet of Things (IoT)*, a Internet das Coisas refere-se à integração de objetos físicos e virtuais em redes conectadas à Internet, permitindo que os objetos colem, troquem e armazenem dados que serão processados e analisados, gerando informações e serviços em grande escala. São muitas as possibilidades de objetos conectados: automóveis, smartphones, eletrodomésticos, artigos de vestuário, fechaduras, entre outros aparelhos. (ALMEIDA, 2015) Como grande aliado dos usuários de dispositivos com internet das coisas, são as nuvens de armazenamento e processamento de dados, permitindo assim que os dados estejam seguros e possam ser acessados e processados de qualquer local com acesso à internet.

O *National Institute of Standards and Technology (NIST)* define computação em nuvem como um modelo que permite que um conjunto de recursos computacionais possam ser fornecidos sob demanda de forma a permitir que os mesmos sejam fornecidos e liberados rapidamente com o mínimo de esforço de gestão ou interação do fornecedor (MELL, GRANCE, 2009). VAQUERO et al 2008, define computação em nuvem como um grande conjunto de recursos virtualizados (hardware, plataformas de desenvolvimento e/ou serviços) facilmente usáveis e acessíveis.

### 2.3 Manutenção preditiva

Conforme NBR 5462, Manutenção Preditiva é a atuação realizada com base na modificação de parâmetros de condição ou desempenho, cujo acompanhamento obedece a uma sistemática. A manutenção preditiva 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 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1994)

Com o advento de novos equipamentos para análises preditivas, o conceito de manutenção preditiva tem sido cada dia mais utilizada devido ao seu potencial de aumento da confiabilidade e disponibilidade dos equipamentos, com um custo menor do que quando utilizada a técnica de manutenção preventiva.

### 2.3.1 Disponibilidade

A disponibilidade é o indicador mais importante para a gestão de manutenção. As perdas em todo o processo produtivo devido a falhas em equipamentos são enormes, e o objetivo da manutenção deve ser propiciar a máxima continuidade operacional através de uma grande disponibilidade. (VERRI, 1995) O indicador da disponibilidade é definido como a probabilidade de um determinado equipamento estar disponível para operar quando necessário. (MARTINS, 2012) Dessa forma o tempo indisponível retrata o tempo total que a perda por manutenção impediu que houvesse produção em determinado período programado. Para calcular a Disponibilidade, divide-se MTBF pela soma dos tempos MTBF e MTTR, revelando o total de tempo que o equipamento esteve indisponível devido à uma ação da manutenção. Ou seja, do total trabalhado, o quanto que a manutenção afetou a disponibilidade do equipamento e por consequência a produção. A Equação na figura 1 mostra o cálculo a ser feito.

Onde:

MTBF = Tempo Médio Entre Falhas

MTTR = Tempo Médio Para Reparos

$$\% \text{ Disponibilidade} = \frac{\text{MTBF}}{\text{MTBF} + \text{MTTR}} \times 100$$

Figura 2 – Equação para cálculo de disponibilidade de ativos

### 2.3.2 Análise vibração

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) (ALMEIDA, 1990). Sendo essa a principal técnica para análise de equipamentos rotativos de forma preditiva.

## 3. Método

O experimento neste trabalho propôs monitorar de forma *online* a vibração e temperatura de um componente da máquina ondulateira, disponibilizando os dados em nuvem através de sensores inteligentes, possibilitando um monitoramento online com dashboard a vista e também com dispositivos *mobile* para que a manutenção possa intervir de forma preditiva, com maior confiabilidade, realizando intervenções mais assertivas com menores custos e impactos na linha de produção.

Foi utilizada uma sequência para esta aplicação iniciando pela escolha do equipamento, escolha dos recursos tecnológicos, instalações e definições de limites e o monitoramento online.

### 3.1 Escolha no equipamento

A escolha do equipamento para a aplicação do projeto piloto foi determinada com base em indicadores relacionados a disponibilidade do equipamento como também nos indicadores gerais da fábrica. O principal foi o indicador de disponibilidade de manutenção (%).

Foram levadas em consideração a classificação ABC, histórico de quebras, custos diretos e indiretos envolvidos e impacto sobre os processos seguintes para garantia de atendimento a sequência de produção da fábrica e principalmente ao atendimento ao cliente para escolha da máquina.

Com as características classificadas, a máquina que tem principal influência nestes indicadores dentro de uma fábrica de papelão ondulado é a máquina onduladeira.

Com a máquina escolhida, aplicou-se uma estratificação do indicador percentual de quebras para identificar o sub local com maior impacto na disponibilidade da máquina.

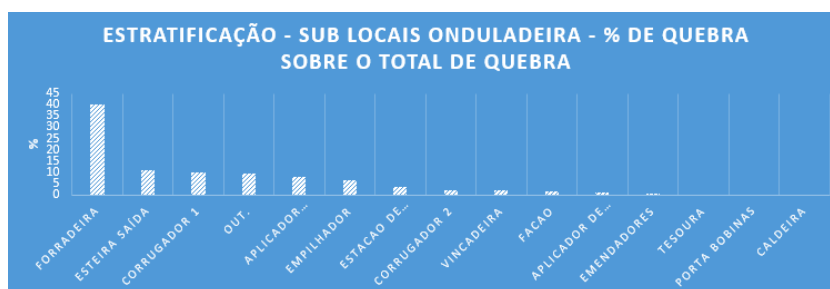


Figura 3 – Gráfico estratificação quebras máquina onduladeira - período 6 meses (fonte: Empresa)

O equipamento escolhido para instalação dos sensores de monitoramento foi a caixa redutora de engrenagens da seção forradeira da máquina onduladeira de chapas de papelão ondulado, pois este sub local apresentou maior percentual de quebra no período analisado que foi de seis meses.

### 3.2 Determinação dos recursos tecnológicos

Os equipamentos foram escolhidos com busca pela correlação das características, conforme lista abaixo:

- Custo;
- Grandezas/dados coletados;
- Tempo de vida útil(bateria);
- Conectividade e acesso;
- Tecnologia /acesso ao fabricante;
- Armazenamento/interação com nuvem/empresa e segurança dos dados.

#### 3.2.1 Sensor *Data Logger*

Foram escolhidos e instalados sensores inteligentes de vibração (acelerômetros) e temperatura da marca Dynamox modelo DynaPredict com conexão *bluetooth* instalados nas

posições axial, vertical e horizontal na caixa redutora de engrenagem para monitoração do estado dos rolamentos e engrenagens. No total foram usados 4 sensores Dynamox.



Figura 4 – Sensor DynaPredict

Características	Descrição
Vibração	Acelerômetro 3 eixos $\pm 16g$ Análise espectral: radial, axial, horizontal: 5Hz - 1kHz
Material	Encapsulamento: LEXAN™ - IP 66 – Certificado ATEX Zona 0
Comunicação	Sem fio   200 – 2483,5 MHz – Bluetooth (BLE 4.2)
Temperatura	-10°C a +84°C (erro: $\pm 0,5^\circ C$ ) Resolução 0,01°C
Dimensão	33mm x 33mm x 35mm
Memória	Amostras de 1 a 60 minutos
Bateria/Energia	Bateria de lítio 3.0V (aprox. 3 anos)
Medições	Aceleração em 3 eixo: radial, axial e horizontal (R, A, H)

Fonte: <https://dynamox.net/solucoes/dynapredict/>

Tabela 1 – Características e descrição do sensor Dynapredict

### 3.2.2 Conectividade e armazenamento em nuvem

Os sensores foram interligados a nuvem através de conexão *bluetooth* com aparelhos *mobile* com aplicativo instalado de forma manual ou pelo *gateway* de comunicação interligado a internet e também com conexão 3G.

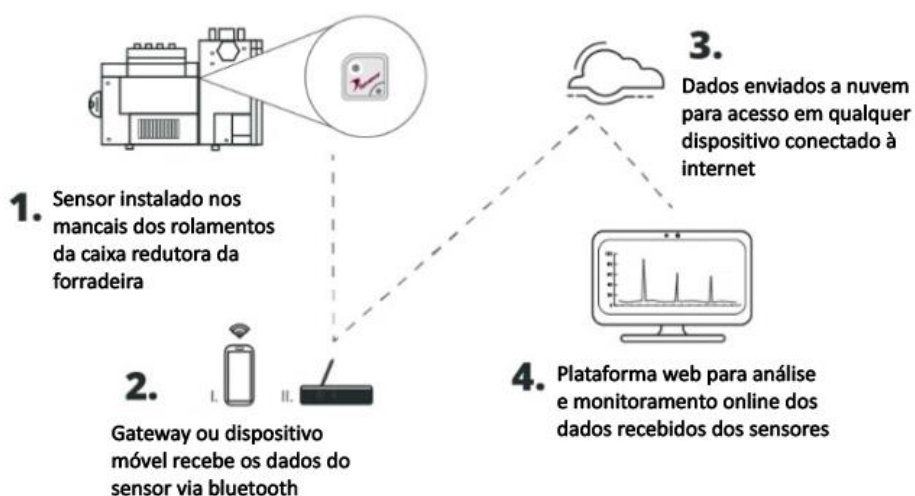


Figura 5 – Fluxo representativo dos dados

### 3.3 Instalação, cálculos e definição de alarmes

A instalação foi realizada conforme instruções do fabricante do sensor nos mancais dos rolamentos da caixa de redução da máquina ondulateira conforme figura a seguir.



Figura 6 – Sensor dynapredict instalado nos mancais dos rolamentos

Os alarmes foram definidos com base nas informações dos fornecedores com base no modelo dos rolamentos e no cálculo do fator de frequência de engrenamento para as engrenagens do conjunto do redutor.



Figura 7 – Engrenagens monitoradas

Rolamentos monitorados para esta aplicação foram os modelos auto compensador de rolos, tipo cilíndrico, gaiola de aço da marca SKF, modelo 22216 E/C3.

### 3.4 Monitoramento em tempo real

Uma das características da indústria 4.0 é a possibilidade de acompanhamento de um sistema ou processo em tempo real.

#### 3.4.1 Plataforma web

Para efetuar o monitoramento *online* e de fácil acesso, foi utilizada a plataforma *web online* Dynamox para análise dos dados e também uma gestão visual com o sistema DMA da plataforma, conforme figuras abaixo, que pode ser acessada de qualquer dispositivo ligado a internet.

O sistema disponibiliza análise de velocidade RMS, pico, pico a pico, temperatura e análise

espectral.

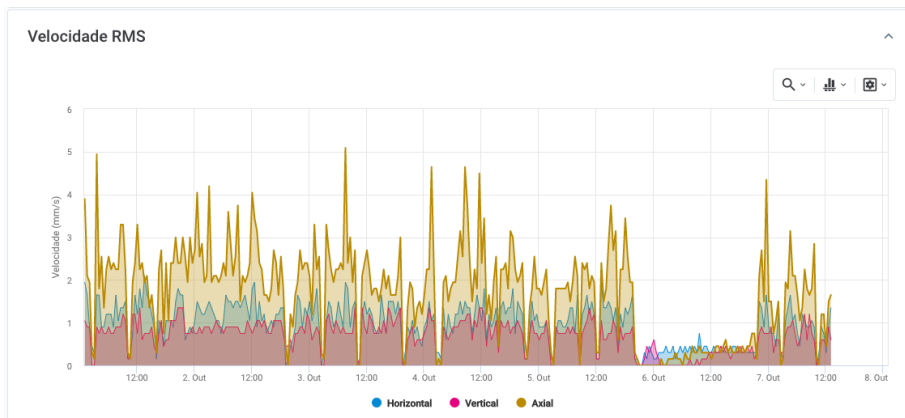


Figura 8 – Exemplo de tela de monitoramento web online - Velocidade RMS 3 eixos

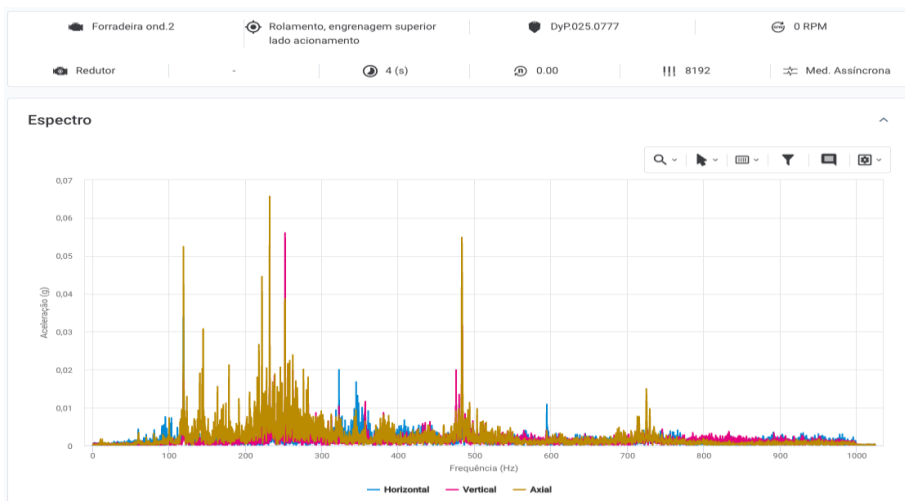


Figura 9 – Exemplo de tela de análise web online - análise espectral

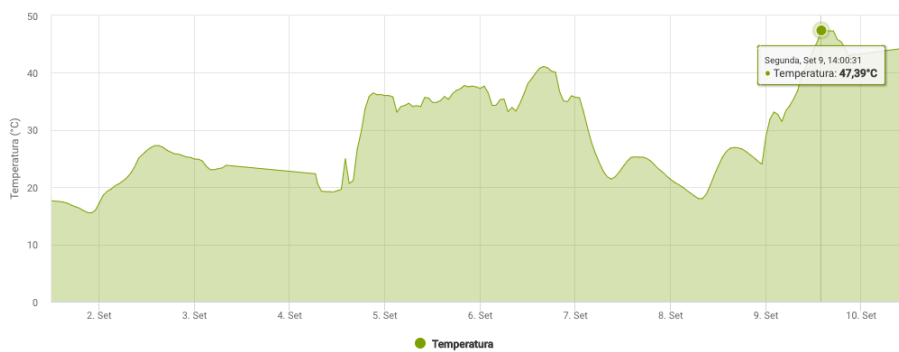


Figura 10– Exemplo de tela de monitoramento web online - Temperatura

Status	Máquina	Spot	Tendência	Vel. média	Temp. média	Acel. média	Espec. X	Espec. Y	Espec. Z	Capacidade					
							BF	AF	BF	AF	BF	AF	BAT	ESC	ÚLT. SINC
—	Forradeira ond.2	Rolamento, engren...	○○○○○○○○	0,98 -	32,08 -	—	X	X	X	X	X	X	🟢	🟢	há 11 horas
—	Forradeira ond.2	Rolamento, engren...	○○○○○○○○	1,10 -	34,22 -	—	X	X	X	X	X	X	🟢	🟢	há 11 horas
—	Forradeira ond.2	Rolamento lado op...	○○○○○○○○	0,96 -	33,94 -	—	X	X	X	X	X	X	🟢	🟢	há 11 horas
—	Forradeira ond.2	Rolamento lado op...	○○○○○○○○	0,90 -	31,06 -	—	X	X	X	X	X	X	🟢	🟢	há 11 horas

Figura 11 – Exemplo de tela de monitoramento online - DMA



O sistema também pode ser acessado e monitorado por dispositivo móvel, através do aplicativo do fabricante.

### 3.4.2 Plataforma *mobile*

A utilização da plataforma *mobile* sendo possível acesso com qualquer celular *smartphone* ou *tablet* trouxe uma interação maior e mais rápida ao time de manutenção, pois possibilitou realizar análises pontuais em campo quando necessário, evitando um gasto de tempo da ida até o escritório acessar um computador.



Figura 12– Exemplo de telas de monitoramento mobile (Dynamox, 2019)

## 4. Resultados

Anteriormente estas análises de vibração e temperatura eram realizadas com dispositivo móvel manual, realizada por um técnico especialista em um período determinado a cada três meses. Estes dados coletados em campo eram descarregados em um computador com acesso apenas local, e o tempo para receber um resultado decorria de muitas horas e até dias dependendo da quantidade de equipamentos analisados. Sendo assim não era possível analisar eventos que ocorriam neste intervalo de tempo entre uma coleta e outra e que poderiam contribuir para análises de falhas e a construção de contra medidas.

Com a implementação deste sistema de monitoramento em tempo real sem fio da vibração e temperatura de um conjunto mecânico componente de um sub local da máquina onduladeira foi possível identificar de forma mais rápida e assertiva possíveis tendências de falhas e relacionar com eventos externos para uma melhor tomada de decisão da equipe de manutenção.

O monitoramento em tempo real auxilia com as informações de alarmes e curvas de tendência, evitando redução de disponibilidade por quebras inesperadas e a necessidade de manutenção corretiva não planejada.

O sistema *mobile* traz uma rápida conexão em campo ao mantenedor para, assim tomar decisões de forma mais rápida e assertiva.

Durante três meses de monitoramento foi possível identificar o aumento da vibração

repentina em um dos rolamentos, o que possibilitou a equipe de manutenção planejar a parada para substituição do rolamento de forma programada, garantido assim, maior disponibilidade do equipamento durante o tempo programado para produção.

Os indicadores que apresentaram aumento com maior confiabilidade dos equipamentos monitorados em tempo real de forma preditiva.

- (%) Disponibilidade;
- (t) MTBF;
- (%) Confiabilidade.

Indicadores que apresentaram redução com maior confiabilidade dos equipamentos monitorados.

- (R\$) Custos de manutenção;
- (t) MTTR.

Outros indicadores afetados positivamente e o OTIF (*On Time In Full*) representando a melhor assertividade quanto a entrega dos produtos na data especificada pelo cliente.

## 5. Conclusão

Podemos concluir que quando comparada aos sistemas tradicionais de análise de vibração e temperatura, aquele com coleta de dados realizada de forma manual, com técnicos se deslocando pela fábrica e muitas vezes em locais perigosos, podemos perceber inúmeras vantagens com a utilização de sistemas com sensores inteligentes *IoT*, interligados a nuvem. Com a possibilidade de acesso aos dados qualquer momento para manutenção preditiva de um equipamento, aumentam as possibilidades de tomada de decisão da equipe de manutenção dentro de um parque industrial, principalmente no que tange ao aumento da disponibilidade de ativos.

Somado ao uso dos sensores em campo, o uso de *dashboard* para auxílio ao monitoramento e tomada de decisão é fundamental para o aumento do desempenho de uma planta industrial, mais ainda com o uso de dispositivos *mobile*, que aumenta a conexão do mantenedor em campo com a máquina monitorada.

A expansão deste projeto pode gerar outros ganhos de aumento de disponibilidade com a implementação em outros locais deste mesmo equipamento como também em outros pontos dentro de uma planta industrial de produção de papelão ondulado como também em todo tipo de processo que envolva máquinas rotativas.

Portanto, a principal razão para a adoção do sistema estudado é o econômico, pois melhora resultados como indicadores de: disponibilidade, MTBF, MTTR, confiabilidade, custos de manutenção e pontualidade de suas entregas, estes que impactam diretamente no resultado financeiro de uma empresa.

## Referências

ALMEIDA M. T. **Vibrações mecânicas para engenheiros**, São Paulo, Ed. Edgard Blücher, 1990.

ALMEIDA, H. **Apresentação - Internet das Coisas: Tudo Conectado. Computação Brasil - Revista da Sociedade Brasileira de Computação**. disponível em: <

[http://www.sbc.org.br/images/flippingbook/computacaobrasil/computa\\_29\\_pdf/comp\\_brasil\\_2015\\_4.pdf](http://www.sbc.org.br/images/flippingbook/computacaobrasil/computa_29_pdf/comp_brasil_2015_4.pdf)> Acesso em: 06 de ago. 2019

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5462: Confiabilidade e manutenibilidade**. Rio de Janeiro, 1994.

BHS, **Visão panorâmica - exemplo de uma máquina onduladeira** disponível em <<http://www.bhs-asiapacific.com/?en-p-d-61.html>> Acesso em: 7 de set. 2019.

DYNAMOX. **Características e descrição do sensor Dynapredict** . Disponível em: <<https://dynamox.net/solucoes/dynapredict/>> Acesso em: 09 set 2019.

LEE, J., BAGHERI, B., & KAO, H. A. A cyber-physical systems architecture for industry 4.0-based manufacturing systems. **Manufacturing letters**, Cincinnati, v.3, p.18-23, 2015

MARTINS, A. P. R. **A Influência da Manutenção Industrial no Índice Global de Eficiência (OEE)**. Lisboa, 26 p., 2012. Dissertação (Mestrado) — Universidade Nova de Lisboa.

MELL, P.; GRANCE, T. **The NIST Definition of Cloud Computing**. disponível em <<https://nvlpubs.nist.gov/nistpubs/Legacy/SP/nistspecialpublication800-145.pdf>> Acesso em: 10 de set. 2019

PRESSANTE, A. J. **O ecodesign como instrumento de educação ambiental em instituições de ensino fundamental**. Porto Alegre, 2004. 152 p. 2004 Dissertação (Mestrado) - UFRGS

ROBERT, N. T. F. **Dossiê técnico processo de embalagem de papel**, Rede de Tecnologia e Inovação do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2007.

SILVA, R. F. I. **Avaliação do processo de fabricação de uma unidade industrial convertidora de embalagens**. Curitiba, 12 p., 2013. Trabalho conclusão de curso – Universidade Federal do Paraná.

VAQUERO, L. M. et al. A break in the clouds: towards a cloud definition. **Revista ACM SIGCOMM Computer Communication**, New York, v.39, n.1, p.50–55, 2008.

VERRI, L. A. **Gerenciamento pela Qualidade Total na Manutenção Industrial Aplicação e Prática**. Campinas, p 52, 1995 Dissertação (Mestrado) - UNICAMP