

Desenvolvimento de Sistema IoT para Monitoramento Industrial

Resumo

O monitoramento da condição de máquina fornece informações importantes sobre o estado de operação de um equipamento, o que permite planejar uma intervenção de manutenção antes que uma falha ocorra ou ainda determinar se um processo poderá sofrer perda de qualidade. Através deste projeto, pretende-se avaliar e desenvolver um protótipo de sistema de monitoramento de condição de máquina baseado em tecnologia IoT para detecção do estado de operação em equipamentos integrados a uma planta de processos industriais e com indicação de estado por meio de realidade aumentada.

Palavras-chave: condição de máquina, IoT, realidade aumentada.

1. Objetivos

Este projeto visa desenvolver um sistema para o monitoramento da eficiência energética predial a partir de um protótipo de um sistema de monitoramento de condição de máquina baseado em tecnologias da Indústria 4.0 como IoT (*Internet of Things*, ou Internet das Coisas). O sistema monitora e detecta falhas baseado na extração de características de complexidade de sinais de vibração obtido com acelerômetros e giroscópios MEMS, sinais de corrente e de tensão. Os dados coletados são disponibilizados em rede TCP/IP para serem acessados por um sistema de automação. Para desenvolver as atividades são solicitadas **2 (duas) bolsas**. Os **objetivos específicos** deste projeto são:

- Validar e desenvolver uma plataforma IoT de monitoramento de condição de equipamentos industriais, incorporando ao sistema diferentes sensores de gases, além dos já presentes acelerômetros, giroscópios e de temperatura.
- Desenvolver uma aplicação de realidade aumentada para exibição dos dados coletados pelo sistema IoT.

2. Descrição do Problema e Solução Proposta

O monitoramento de condição de máquina surgiu na década de 70 como uma forma de atuar sistematicamente com base na modificação de parâmetros de condição ou desempenho. Na manutenção preditiva, industrial ou predial, é desejável que os equipamentos sejam constantemente monitorados de modo que seja possível detectar precocemente possíveis falhas. Conforme afirmam Kardec e Nascif (2001), a detecção precoce de falhas ajuda a prevenir quebras e interrupções não programadas da linha produção, assim como facilita o planejamento da manutenção e também ajuda a diminuir custos e desperdícios de materiais de energia.

Existem diferentes métodos para monitorar equipamentos em modo periódico ou contínuo (*on line*) (SARTORI *et al.*, 2012). A análise espectral do sinal de vibração do equipamento monitorado é uma metodologia de particular interesse porque é um método não invasivo. Essa metodologia emprega a análise por Transformada Rápida de Fourier (FFT, do inglês *Fast Fourier Transform*) para obter o espectro de frequência de sinais de vibração obtidos com transdutores de vibração fixados na máquina monitorada.

Muitos trabalhos têm investigado o uso de acelerômetros MEMS (*Microelectromechanical System*) em substituição aos acelerômetros piezoelétricos. Sensores MEMS são aplicados desde a detecção de falhas em automóveis (REBELLO *et al.*, 2010) a monitoramento de ventiladores (CHEN *et al.*, 2010). No trabalho de Maruthi e Vittal (2005) foram utilizados acelerômetros MEMS em substituição aos tradicionais acelerômetros piezoelétricos no monitoramento de falhas em motores monofásicos gaiola de esquilo. Entretanto, o uso de sinais de vibração obtidos com acelerômetros MEMS requer alguns cuidados especiais (ALBARBAR *et al.*, 2008). Os acelerômetros MEMS são

mais limitados do que os piezoelétricos em banda de frequência e, em geral, fornecem um sinal distorcido com harmônicas fantasmas por causa do fenômeno *aliasing* (OPPENHEIM; SCHAFER, 2010). Esse problema é intensificado quando o sinal é medido em um equipamento acionado por conversores eletrônicos de frequência. O trabalho de SWATHI *et al.* (2017) ilustra como uma plataforma IoT pode ser aplicada no monitoramento *online* de geradores visando a manutenção preditiva.

A realidade aumentada (RA) tem se tornado presente na indústria, especialmente no que se refere à adoção de tecnologias digitais, como na indústria 4.0. As aplicações da RA são diversas, indo desde a fase do projeto de equipamentos até a segurança das pessoas em ambientes de produção automatizados (ALARCON *et al.*, 2020).

2.1 Solução Proposta

Este projeto propõe implementar em um sistema embarcado uma metodologia para monitoramento da condição de operação de máquina baseada em sinais de vibração obtidos com acelerômetros MEMS ou sinais de tensão e corrente obtidos de forma não invasiva. A Figura 1 ilustra o desempenho de uma máquina ao longo de sua vida útil. Quando as condições operacionais da máquina começam a mudar, ocorrerá o aumento de ruído e a máquina terá seu desempenho reduzido significativamente. Se o desempenho cai abaixo do nível de alarme, os custos de manutenção crescem exponencialmente e a eficiência energética diminui drasticamente. Os acelerômetros MEMS possuem a vantagem de que podem ser obtidos a uma fração do custo de sensores piezoelétricos, além de que seu tamanho possibilita o desenvolvimento de sistemas embarcados simples e pequenos. Entretanto, devido a limitações intrínsecas dos sensores MEMS (ALBARBAR *et al.*, 2008), a metodologia proposta se aplica ao monitoramento e detecção de falhas mecânicas ou elétricas que possam ser caracterizados em baixas frequências e através de reconhecimento de padrões obtidos do sinal de vibração. Em alguns casos específicos, como o monitoramento de motores elétricos, além dos acelerômetros é possível coletar sinais de tensão e corrente para auxiliar a detecção de determinados tipos de falhas. As características do sinal são analisadas e classificadas conforme o estado de operação do equipamento monitorado.

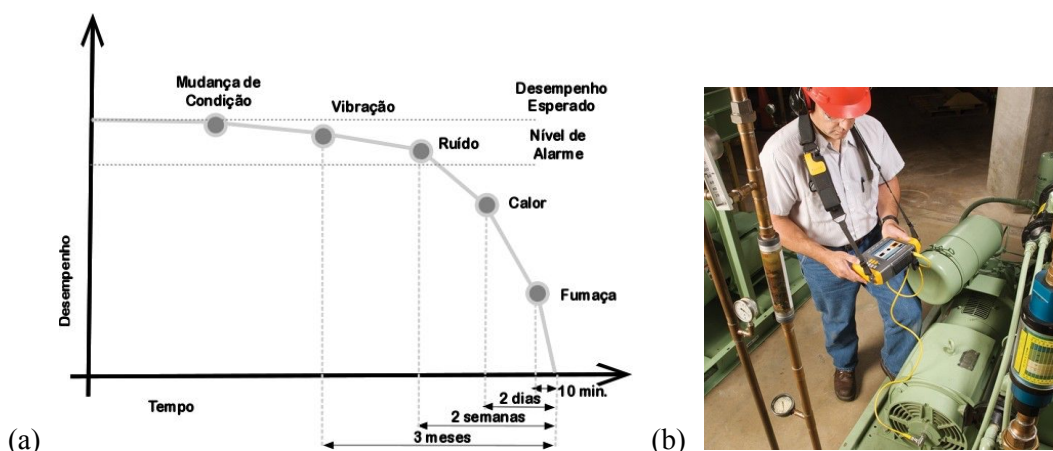


Figura 1. (a) Sinais de alarme de uma máquina sujeita a falhas. Adaptado de National Instruments (2015). (b) Monitoramento periódico de equipamentos usando analisador de vibração¹.

O processo de análise do sinal de vibração empregado neste projeto, ilustrado na Figura 2(a), foi patentado no Instituto Nacional de Propriedade Industrial (INPI) intitulado DISPOSITIVO E PROCESSO DE MONITORAMENTO ON-LINE ADAPTATIVO DE VIBRAÇÃO e registrado com

¹ Disponível em:

<https://www.getrotech.com.br/loja/teste-medicao/mecanica/vibracao/fluke-810-analisador-de-vibrac-o-fluke.html>

Nº PI 1104949-9. Esse método utiliza quatro descritores baseados nos coeficientes de detalhes de decomposições *wavelet* (MALLAT, 1999) e dimensão fractal (FALCONER, 2003) do sinal de vibração obtido com acelerômetros MEMS. Outros descritores serão investigados ao longo deste projeto (RAMALHO *et al.*, 2012; RAMALHO *et al.*, 2013). A metodologia adotada é adaptativa e independe da análise espectral do sinal de vibração, não requerendo um banco de dados com informações prévias para comparação. Com o processo ilustrado na Figura 2(a), obtém-se os dados a partir de ensaios com um motor submetido a diferentes condições de carga e operação.

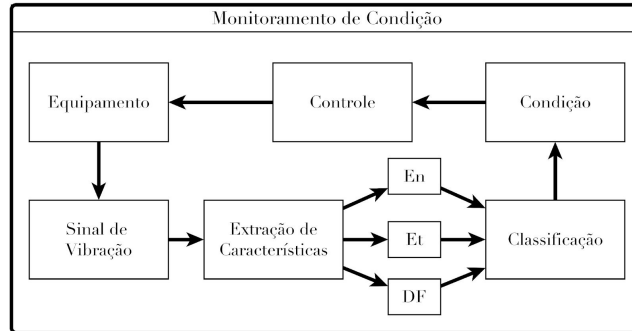


Figura 2. Metodologia de monitoramento de condição e detecção de falhas.

Para ampliar a aplicabilidade da metodologia, diferentes tipos de sensores MEMS podem ser empregados, a saber, sensores de temperatura e giroscópios. Outro fator importante a ser investigado com o desenvolvimento do protótipo é uma metodologia de reconhecimento de padrões que permita realizar de forma automática e *on line* um monitoramento da eficiência energética dos equipamentos. Pretende-se utilizar comitês de classificadores usando métodos estatísticos (WEBB, 2002), redes neurais não supervisionadas (HAYKIN, 2001) e seleção de características (JAIN; ZONGKER, 1997). Neste projeto será avaliada a análise estrutural de sinais (RAMALHO *et al.*, 2016) para diversificar a aplicação do dispositivo e, possivelmente, gerar uma nova patente. O trabalho será desenvolvido em etapas, com segue.

2.1.1 Aprimoramento do sistema embarcado de aquisição de dados

A medição da vibração é realizada com um acelerômetro MEMS triaxial (Freescale MMA7361). Este sensor possui banda de frequência pequena 400 Hz, faixa de medição $\pm 1,5$ g ($\pm 1,6$ V) e sensibilidade de 100 mV/g, adequados para os níveis de intensidade e de frequência de vibração monitorados. A frequência de ressonância do sensor é da ordem de 6 kHz, bem abaixo da faixa de frequências medidas. A sensibilidade transversal (*cross axis*) do sensor é de ± 5 %. Neste projeto pretende-se utilizar outros dispositivos MEMS como giroscópios, transdutores de áudio e de temperatura. A aquisição do sinal de vibração é obtida com um sistema microcontrolado e sensores MEMS em rede. A Figura 3 ilustra usos típicos, dados coletados e tipos de padrão detectáveis. O sensor (com fio, neste exemplo) é fixado na carcaça do equipamento monitorado para medir a vibração eixo no sentido radial vertical, indicado na imagem pelo sistema de coordenadas +x (radial vertical), -y (radial horizontal) e +z (axial).



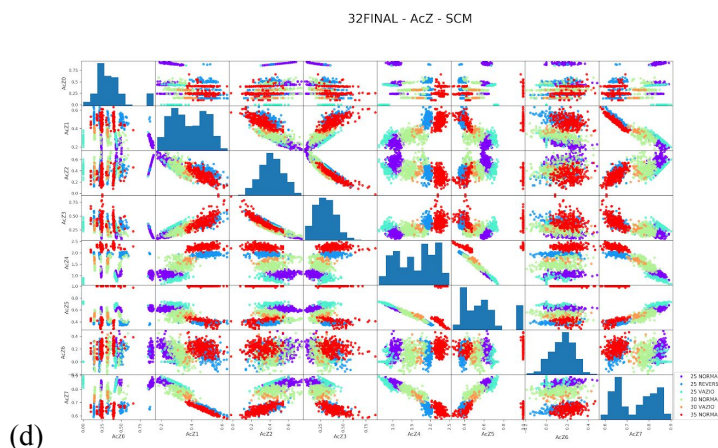


Figura 3. Aplicação típica do protótipo: (a) conjunto motor/carga; (b) bomba centrífuga em uma planta industrial; (c) sinal dos acelerômetros e giroscópios triaxiais; (d) padrões de vibração da bomba.

Além do uso de sensores MEMS, sejam acelerômetros, giroscópios, temperatura, também é possível aplicar metodologia similar para detecção de falhas elétricas usando sinais de vibração ou sinais de corrente (SOUSA *et al.*, 2018). Além de bombas e motores, é possível expandir o uso dessa metodologia para o monitoramento de aparelhos condicionadores de ar, ambos equipamentos comuns em qualquer instalação predial pública ou privada, industrial ou residencial. Além disso, é necessário melhorar detalhes técnicos do protótipo como: integração de sensores de gás e de corrente; aprimoramento da fixação do sensor no equipamento monitorado; aprimoramento do protocolo de comunicação; aprimoramento do *hardware* (placa e layout; microcontrolador e memória).

2.1.2 Aprimoramento de algoritmos de caracterização dos sinais

Os algoritmos devem ser computacionalmente simples para que possam ser embarcados em sistemas microcontrolados, preferencialmente sem a necessidade de uso de DSPs (CHOI *et al.*, 2011). Ao mesmo tempo, os algoritmos precisam ser robustos para serem capazes de lidar com uma variedade de diferentes possibilidades. A adoção de uma plataforma computacional de prototipagem de algoritmos é fundamental nesta fase, pois permite investigar os requisitos de forma eficiente além de garantir a produtividade. Em princípio, tanto a coleta de dados quanto o processamento dos sinais serão realizados por um sistema microcontrolado. Este sistema enviará os dados já processados a um computador para exibição de gráficos e mensagens. Entretanto, os testes de validação irão mostrar se as limitações de hardware poderão ser compensadas ou não com a otimização dos algoritmos. Caso não seja viável processar o sinal no microcontrolador, os dados serão transmitidos por uma rede para um programa de retaguarda rodando em um computador.

Métricas para caracterização do sinal

Um sinal de vibração é uma composição de diversas frequências e apresenta um padrão estocástico bastante complexo. Esta complexidade pode ser descrita a partir de padrões estruturais detectados com a Matriz de Coocorrência Estrutural (SCM).

A análise estrutural de sinais (RAMALHO *et al.*, 2016) por meio da SCM, originalmente proposta para a análise de imagens digitais, também tem sido aplicada com sucesso em diversas aplicações recentes (SOUSA *et al.*, 2018).

2.1.3 Desenvolvimento de um sistema IoT para monitoramento dos equipamentos

O sistema IoT proposto, ilustrado nos diagramas da Figura 5, utiliza controladores lógicos programáveis (CLP) e sistemas de aquisição de dados e controle supervisório (SCADA) com comunicação via protocolo MODBUS com o protótipo do dispositivo de detecção de falhas adaptado para análise de sinais de corrente. Um protótipo do sistema IoT previamente desenvolvido com base em plataformas de desenvolvimento, a saber Raspberry Pi e ESP 8266 será aprimorado. Um modelo em Redes de Petri Hierárquica (RPH) será utilizado para simular diferentes condições de operação visando o desenvolvimento de um algoritmo de controle supervisório capaz de tomar decisões automaticamente para a parada ou mudança de parâmetros do equipamento. Neste projeto, utilizaremos o modelo RPH detalhado em MOREIRA *et al.* (2015). A plataforma de IoT criada anteriormente será aprimorada com o uso de protocolos padrão como o MQTT, protocolos industriais como o MODBUS e com a criação de um *backend* próprio para troca de informações entre o sistema IoT e o sistema de automação.

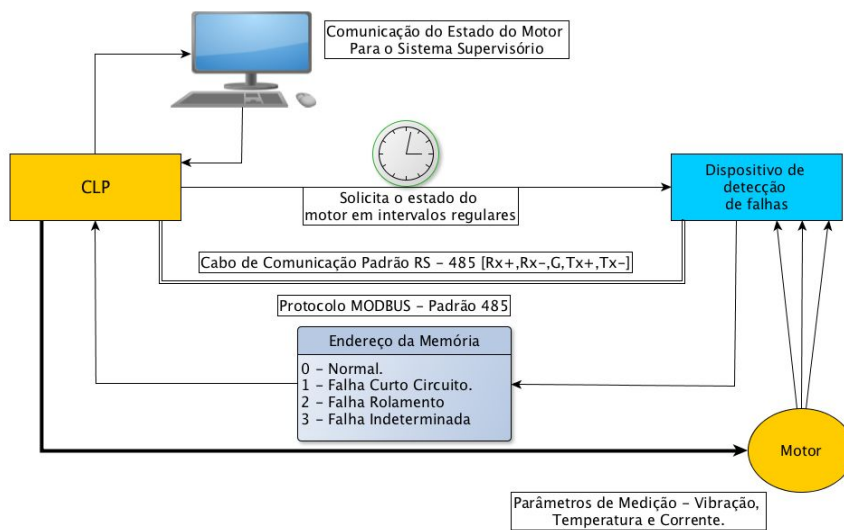


Figura 5. Diagrama de blocos do sistema com dispositivo de detecção de falhas (protótipo) e sistema supervisório (SCADA).

2.1.4. Implementação do sistema de monitoramento com realidade aumentada

Pretende-se instalar protótipos em uma planta didática de processos industriais a fim de realizar o monitoramento contínuo de bombas, motores e eletroválvulas. Os dados coletados serão utilizados para desenvolver um sistema móvel de realidade aumentada em plataforma iOS ou Android. Esse sistema será integrado ao processo de automação da planta. Serão gerados relatórios mensais e, ao final desse período, será realizada uma análise dos dados coletados com cruzamento com os dados de manutenção e operação.

3. Revisão Bibliográfica e Busca de Anterioridade

O **estado da arte** aborda a questão da inspeção automática e o monitoramento de equipamentos (YOKOYAMA *et al.*, 2012; FEKI; CLERC; VELEX, 2013; TAKBASH; FAIZ; EBRAHIMI, 2013; IMMOVILLI CLAUDIO BIANCHINI; RUBINI, 2013; PRIETO; ESPINOSA; HENAO, 2013; CHINE *et al.*, 2014), compreendendo desde falhas mecânicas até as falhas elétricas. Dentre as diversas técnicas empregadas estão a extração de atributos estatísticos com dependência temporal, redes neurais, transformada rápida de Fourier (FFT), curtograma (baseado na transformada de Gabor) e transformada *wavelet*. Diferentes tipos de sinais são analisados como, por exemplo, a corrente de motores (FEKI; CLERC; VELEX, 2013), parâmetros de óleo lubrificante e vibração medida por acelerômetros (IMMOVILLI CLAUDIO BIANCHINI; RUBINI, 2013). Pesquisas recentes apresentam bons resultados no uso de comitês de classificadores neurais (RAMALHO; MEDEIROS, 2006), na seleção automática de características usando comitês (RAMALHO; MEDEIROS, 2007) e na avaliação da importância de descritores através de métodos estatísticos de classificação e análise

estatística (MEDEIROS *et al.*, 2010). Em Paiva, Galvão e Rodrigues (2009), foi utilizada a Transformada *wavelet* (TW) na filtragem do sinal com o objetivo de detecção de falhas em sistemas dinâmicos. A TW foi utilizada para identificar modelos das sub-bandas do comportamento normal do sistema monitorado. Em Li, B. *et al.* (2011) foi proposto um esquema de extração e seleção de características baseado em *wavelets* visando a detecção de falhas em caixas de engrenagens. Konar e Chattopadhyay (2011) empregaram o uso de extração de características do sinal de vibração baseado em transformada *wavelet*. Os autores utilizaram um equipamento de testes para coletar sinais de vibração obtidos com um sensor piezelétrico. A partir das decomposições *wavelet* foram extraídas medidas e posteriormente estas medidas foram classificadas utilizando uma Máquina de Vetor de Suporte (SVM). No trabalho de Jiang e Liu (2011) é investigado o monitoramento de condição de máquina através da extração de características que indicam a deterioração do equipamento. Em Li *et al.* (2010) obtiveram êxito na detecção de falhas em caixas de engrenagens utilizando uma *wavelet* Hermetiana. A detecção de falhas em conjuntos motor-bomba foi explorada por BRITO *et al.* (2008). Os autores mostraram bons resultados com o uso de redes neurais artificiais e a extração de características de sinais de vibração. Também destaca-se na literatura o modelo de um sistema de monitoramento automático apresentado por MOREIRA *et al.* (2015). O resultado do estudo simulado desse modelo mostra que ele pode ser empregado como referência para a implementação do *firmware* e do *software* de *frontend* do sistema de monitoramento. Mais recentemente, SWATHI *et al* (2017) integraram um sistema de monitoramento de condição de geradores em uma plataforma IoT, adotando a integração de sistemas de prototipagem e sensores MEMS no seu desenvolvimento.

O **estado da técnica** apresenta algumas soluções parciais para os objetivos propostos. O documento PI9800274-0 A2 revela um "dispositivo portátil fixável a uma prensa mecânica para medir condições da prensa e processo de monitorar níveis de severidade de vibração em uma prensa". A invenção se refere à monitoração das vibrações de prensa e a um processo de gerar um indicador da capacidade da severidade de vibrações da carga/velocidade de prensa para a determinação de confiabilidade operacional durante a operação de produção. O documento US 5,602,757 revela um sistema de monitoramento de vibrações de uma máquina compreendendo a máquina a ser monitorada, um microcontrolador, um sensor acelerômetro conectado à máquina e ao microcontrolador, e meios para o computador processar os sinais vibratórios recebidos e compará-los com um padrão vibratório de referência. As duas invenções descritas não são adaptativas, não consideram a medição simultânea de mais de uma direção de aceleração, além de estarem limitados a um único tipo de equipamento ou à existência de um banco de dados. O documento US 4,010,637 descreve um monitorador e medidor de vibrações de uma máquina causadas pela rotação desbalanceada de seus rotores para a determinação preditiva de excesso de vibração compreendendo um acelerômetro conectado à máquina, um amplificador e filtro de sinal e um osciloscópio conectado ao sinal, para que o mesmo seja comparado a um padrão vibratório de referência. O método proposto neste projeto difere deste documento por compreender medição em múltiplos eixos, comunicação sem fio e um sistema de aprendizagem automática de padrões vibratórios *on-line*. O documento mais recente encontrado, AU2017232224 (A1) "Methods and systems for determining an energy performance measure for a property", de 2018, apresenta um método e sistema para executar um algoritmo de análise de classificação de energia usando o plano de construção, dados de componentes de energia consumíveis e produzir, a partir do algoritmo, uma classificação de eficiência energética padronizada para a propriedade. No entanto o documento não antecipa a forma de coleta desses dados, dando a entender que utiliza dados de projeto para realizar o diagnóstico e, portanto, não realiza monitoramento. A proposta em CN208399949 (U) - "Laboratory monitored control system based on NB -IOT" trata-se de um modelo de utilidade que fornece um sistema de controle monitorado de laboratório baseado em NB IOT. Esse sistema propicia ao pessoal de gestão do laboratório um entendimento preciso mais abrangente para a condição de laboratório por meio do registro de dados do ambiente como, por exemplo, temperatura e umidade. Assim, do que se depreende da literatura pesquisada, não foram encontrados documentos antecipando ou sugerindo os ensinamentos da solução aqui proposta, de forma que possui novidade e atividade inventiva frente ao estado da técnica.

4. Diferenciais e Benefícios

Os principais diferenciais apontados são:

- Sensores acelerômetros e giroscópios MEMS são dispositivos simples e possibilitam a aquisição do sinal de vibração simultaneamente em três direções de uma forma não invasiva;
- Os sensores MEMS ou de temperatura, de tensão e corrente são compactos e leves, podendo ser incorporados ao equipamento monitorado sem prejuízo do seu funcionamento, projeto ou da coleta de dados, com baixo consumo de energia;
- Uma rede de sensores coleta informações em diferentes locais de monitoramento amplia sua utilização e potencializa resultados;
- O sistema de realidade aumentada facilita o monitoramento do estado do equipamento em campo.

Entende-se como benefícios do dispositivo proposto:

- Estima-se que o custo do produto final, mesmo considerando o valor agregado e a produção em escala, seja uma fração do preço das soluções comerciais que giram em torno de alguns milhares de reais, dependendo do tipo de aplicação;
- A maior facilidade e flexibilidade de uso e escalabilidade, quando comparado às soluções comerciais, permitirá uma expansão acelerada do seu uso dentro de indústrias ou instalações prediais com ampliação das informações de desempenho destinadas ao planejamento da produção e ao controle de qualidade;
- Contribui para diminuir custos ao detectar condições associadas a falhas antes da quebra do equipamento e, propicia um melhor planejamento da manutenção, antes que o equipamento se torne energeticamente ineficiente.

5. Transferência de Tecnologia

A tecnologia desenvolvida através deste projeto poderá ser empregada na forma de licenciamento para fabricação de um produto visando o consumidor final, ou na forma de licenciamento da tecnologia para que seja embarcada em equipamentos como motores, bombas, transformadores, compressores, máquinas-ferramenta etc. Especialmente a indústria de fabricação de motores elétricos, motor-bomba, e a indústria de eletrodomésticos são vistas como potenciais destinos para a tecnologia.

Os bolsistas envolvidos no projeto serão incentivados a criar uma empresa incubada de modo a produzir o dispositivo e/ou prestar serviço de implantação de uma solução integrada de manutenção preditiva com o auxílio da tecnologia desenvolvida. Empresas que são potenciais licenciadores dessa tecnologia incluem a WEG (fabricante de motores elétricos), a WHIRLPOOL (fabricante de compressores de geladeiras), a SCHNEIDER ELECTRIC (fabricante de soluções de acionamento e automação industrial) dentre outros. Entretanto elas serão contactadas após a validação do protótipo.

6. Modelo de Negócio

Na Tabela 1 é apresentado um modelo de negócio sucinto na metodologia Canvas. Estima-se que o custo de embarcar o produto proposto em equipamentos como motores e bombas, corresponde a menos de 1% do custo total de produção, se for adotado um modelo de parceria entre a empresa produtora do equipamento e a empresa produtora da solução de monitoramento. Entretanto, a solução final da integração representa um valor agregado de até 10% do preço de mercado.

A forma de atingir esse objetivo de impacto mínimo nos custos de produção e aumento do valor agregado do equipamento passa por três estratégias: i) embutir sensores que custam em torno de US\$ 1 nos equipamentos, sem grandes alterações na linha de produção, pois os sensores são pequenos e não será necessário modificar o projeto original do equipamento; ii) fornecer o dispositivo de monitoramento de condição (proposto neste projeto) na modalidade de acessório *plug-and-play*,

opcional, como parte da linha de produtos do fabricante do equipamento; iii) ofertar a solução de monitoramento e análise na forma de serviço.

Tabela 1 – Modelo de Negócio

PARCERIAS PRINCIPAIS	ATIVIDADES PRINCIPAIS	PROPOSTA DE VALOR	RELACIONAMENTO COM CLIENTES	SEGMENTO DE CLIENTES
Bombas KING: doação de equipamentos e disponibilização de laboratório próprio para testes	Realizar o monitoramento de condição de máquina, detectar falhas	Tecnologia acessível em escala	Divulgação por meio de experiência prática com o produto em visitas às indústrias	Pequenas e médias empresas que buscam melhorar a eficiência energética, aumentar a qualidade da produção e diminuir custos de manutenção.
	Prover soluções de auxílio à gestão da manutenção e nas estratégias de manutenção preditiva	Método inovador que se adapta às necessidades do processo	Monitoramento e diagnóstico gratuito durante 3 meses para os clientes em potencial	Fabricantes de máquinas rotativas que desejam agregar valor ao seu produto embarcando um sistema de monitoramento e detecção de falhas
	RECURSOS PRINCIPAIS	Integração do produto com os sistemas de manutenção existentes (customização)	CANAIS	
	Equipe com conhecimento técnico e tecnológico no monitoramento e detecção de falhas		Divulgação por meio de experiência prática com o produto	
	Tecnologia de baixo custo, adaptativa		Parceria com lojas especializadas em venda de bombas, motores, maquinário agrícola e de irrigação	
ESTRUTURA DE CUSTOS		RECEITAS		
Escritório para gestão da produção e do negócio		Venda direta de dispositivos de monitoramento e detecção de falhas na forma de produto de prateleira		
Equipe de funcionários treinados no produto e capazes de fornecer treinamento e consultoria		Licenciamento da tecnologia para produção em escala, embarcado em bombas e/ou motores		
Transporte para visitas técnicas periódicas e divulgação do produto		Prestação de serviço de consultoria utilizando o dispositivo de monitoramento e detecção de falhas em comodato		

7. Cronograma de atividades

A execução deste projeto está dividida em 12 meses. As atividades principais foram planejadas conforme o cronograma individual dos bolsistas detalhados nas Tabelas 2 e 3.

Tabela 2 – Cronograma do Bolsista 1 - Desenvolvimento de Hardware

Atividade	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12
Estudos e levantamento bibliográfico sobre sistemas instrumentados de segurança e manutenção com base em IoT para desenvolvimento do <i>backend</i>	■	■	■	■								
Especificação e implementação de melhorias da plataforma IoT de monitoramento de condição de máquina			■	■	■	■						
Realização de ensaios e validação com bombas, motores, aparelhos de ar condicionado, eletroválvulas							■	■	■	■	■	■
Elaboração de relatórios						■						■
Elaboração de artigos ou patentes							■	■	■	■	■	■

Tabela 3 – Cronograma do Bolsista 2 - Desenvolvimento de Software

Atividade	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12
Estudos e levantamento bibliográfico sobre falhas em motores, bombas e aparelhos de ar condicionado, eletroválvulas	■	■	■									
Especificação e implementação do sistema de realidade aumentada integrado ao <i>backend</i> de IoT				■	■	■	■	■				
Realização de ensaios e validação em sistemas de automação							■	■	■	■	■	■
Elaboração de relatórios						■						■

A etapa de levantamento bibliográfico consiste na atividade de revisão bibliográfica e de antecedentes sobre o tema através de consulta a periódicos nacionais e internacionais, e a pesquisa em repositórios de patentes. Nessa etapa, os bolsistas realizarão um levantamento sobre as tecnologias que tornam viável a implementação do protótipo. Também consiste em adquirir conhecimento sobre os tipos de falhas de motores e bombas que têm potencial de serem explorados. A atividade de especificação consiste em pesquisar os dispositivos comerciais atualmente disponíveis e a montagem de um protótipo e de um equipamento para os ensaios. Também consiste em modelar e implementar um sistema supervisor que oferece a retaguarda necessária para a realização de ensaios e validação dos protótipos. A elaboração de relatórios, prevista no cronograma, envolve não apenas os relatórios semestrais exigidos pelo edital, mas também relatórios técnicos e outros documentos que serão produzidos para registro dos resultados da pesquisa. A partir do sexto mês, planeja-se ter dados suficientes para escrever artigos técnicos/científicos, com a participação direta dos bolsistas, visando divulgação do projeto em eventos nacionais ou internacionais.

Referências

- ALARCON, R. et al. Augmented Reality for the enhancement of space product assurance and safety. *Acta Astronautica*, v.168, p.. 191-199, mar, 2020.
- ALBARBAR, ALHUSSEIN; MEKID, S; STARR, A.; PIETRUSZKIEWICZ, R. Suitability of MEMS Accelerometers for Condition Monitoring: An experimental study. *Sensors*, v. 8, n. 2, p. 784-799, 2008.
- BRITO, N. J. et al. Detecção de Falhas em Conjuntos Motor-Bomba Acionados por Inversores de Frequência através de Análise de Vibração e Redes Neurais Artificiais. 23º. Congresso Brasileiro de Manutenção - ABRAMAM, 2008.
- CABAL-YEPEZ. Reconfigurable monitoring system for time-frequency analysis on industrial equipment through STFT and DWT. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*. v. 9, n. 2, p. 760–771, may 2013.
- CHEN, Y. NI, J.; DIEHL, C. A; HEBER, A.; BOGAN, B.; CHAI, L. et al. Large Scale Application of Vibration Sensors for Fan Monitoring at Commercial Layer Hen Houses. *Sensors*, v. 10, n. 12, p. 11590-11604, 2010.
- CHINE, W., MELLIT, A., PAVAN, A. M., KALOGIROU, S. A. Fault detection method for grid-connected photovoltaic plants. *Renewable Energy*. v.66, p. 99-110, 2014.
- CHOI, S.; AKIN, B.; RAHIMIAN, M.; TOLİYAT, H. Implementation of a Fault-Diagnosis Algorithm for Induction Machines Based on Advanced DSP Techniques. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, v. 58, n. 3, p. 937-948, 2011.
- FALCONER, K. **Fractal Geometry: Mathematical Foundations and Applications**. 2nd ed. John Wiley & Sons, 2003.
- FEKI, N.; CLERC, G.; VELEX, P. Gear and motor fault modeling and detection based on motor current analysis. *Electric Power Systems Research*. v. 95, p. 28–37, 2013.
- JAIN, A. K.; ZONGKER, D. Feature selection: evaluation, application, and small sample performance. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, v. 19, n. 2, p. 153-158, 1997.
- JIANG, D.; LIU, C. Machine Condition Classification Using Deterioration Feature Extraction and Anomaly Determination. *IEEE Transactions on Reliability*, v. 60, n. 1, p. 41-48, 2011.
- HAYKIN, S. **Redes Neurais – Princípios e Prática**. 2a ed. Bookman. 2ª edição. Porto Alegre, 2001..
- IMMOVILLI, F.; BIANCHINI, C.; COCCONCELLI, M.; BELLINI MEMBER, I. A.; RU- BINI, R. Bearing fault model for induction motor with externally induced vibration. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. v. 60, n. 8, p. 3408–3418, 2013.
- KARDEC, A.; NASCIF, J. **Manutenção - Função Estratégica**. 2nd ed. Rio de Janeiro: Qualitmark, 2001.
- KONAR, P.; CHATTOPADHYAY, P. Bearing fault detection of induction motor using wavelet and Support Vector Machines (SVMs). *Applied Soft Computing*, v. 11, n. 6, p. 4203-4211, 2011.
- LI, B.; ZHANG, P.-LIN; TIAN, H.; MI, S.; LIU, D.; REN, Guo. A new feature extraction and selection scheme for hybrid fault diagnosis of gearbox. *Expert Systems with Applications*, v. 38, n. 8, p. 10000-10009, 2011.

- LI, H. ZHANG, Y.; ZHENG, H. Application of Hermitian wavelet to crack fault detection in gearbox. **Mechanical Systems and Signal Processing**, 2010.
- LIN, W. Y. *et al.* Robust and accurate estimation using adaptive line integrals. *EURASIP Journal on Advances in Signal Processing*. V.2010, 2010.
- MALLAT, S. **A Wavelet tour of signal processing**. 2nd ed. Academic Press, 1999.
- MARUTHI, G. S.; VITTAL, K. P. Electrical Fault Detection in Three Phase Squirrel Cage Induction Motor by Vibration Analysis using MEMS Accelerometer. **2005 IEEE International Conference on Power Electronics and Drives Systems**, v. 2, p. 838-843, 2005.
- MEDEIROS, F. N. S.; RAMALHO, G. L. B.; BENTO, M. P.; MEDEIROS, L. C. L. On the Evaluation of Texture and Color features for Nondestructive Corrosion Detection. **EURASIP Journal on Advances in Signal Processing**, v.2010, pp. 1–8, julho, 2010.
- MOREIRA, F. D. L. ; SILVA, F. P. A. ; ALMEIDA, J. S. ; RAMALHO, G. L. B. A Study of a Machine Condition Monitoring System Using Petri Nets. **Journal of Mechanical Engineering and Automation**, v. 3, p. 89-93, 2015.
- NATIONAL INSTRUMENTS. Biblioteca Técnica para Monitoramento de Condição de Máquina. Disponível em: <<http://zone.ni.com/devzone/cda/tut/p/id/13482>>. Acesso em: 30/03/2015.
- SOUZA, P. H. F. ; NASCIMENTO, N. M. M. ; REBOUÇAS FILHO, P. P.; MEDEIROS, C. M. S. . Detection and classification of faults in induction generator applied into wind turbines through a machine learning approach. **In: International Joint Conference on Neural Networks – IJCNN**. Rio de Janeiro, 2018.
- OPPENHEIM, A. V.; SCHAFER, R. W. **Discrete-Time Signal Processing**. 3rd ed. Prentice Hall, 2010.
- PAIVA, H.; GALVÃO, R.; RODRIGUES, L. A wavelet-based multivariable approach for fault detection in dynamic systems. **Revista Controle & Automação**, v. 20, n. 4, p. 455-464, Nov. 2009.
- RAMALHO, G. L. B.; MEDEIROS, F. N. S. Using boosting to improve oil spill detection in SAR images. **in Proceedings of the 18th ICPR**, pp. 1066–1069, agosto, 2006.
- RAMALHO, G. L. B.; MEDEIROS, F. N. S. Improving reliability of oil spill detection systems using boosting for high-level feature selection. **in Proceedings of the ICIAR, Lecture Notes in Computer Science**, No. 4633, pp. 1172–1181, agosto, 2007.
- RAMALHO, G. L. B., SCHMIDLIN JR, C. R., BEZERRA, L. D. S, DIAS, S. V. Monitoramento de condição de máquina utilizando acelerômetro MEMS, **Revista Tecnologia (UNIFOR)** 33(1), 2012.
- RAMALHO, G. L. B., PEDROSA, P., SCHMIDLIN JR, C. R, DIAS, S. V. Detecção de condição de máquina utilizando acelerômetro MEMS rede SOFM, **SBAI 2013** (1), 2013.
- RAMALHO, G. L. B. V. Detecção de condição de máquina utilizando acelerômetro MEMS rede SOFM, **SBAI 2013** (1), 2013.
- RAMALHO, G. L. B. V. Rotation-invariant feature extraction using a structural co-occurrence matrix, **Measurement**. v. 94, p. 406-415, nov. 2016.
- RAO, S. **Vibrações Mecânicas**. 4th ed. São Paulo: Prentice Hall, 2008.
- REBELLO, J.; CLEGHORN, W. L.; MILLS, J. K. Design and analysis of a low frequency MEMS vibration sensor for automotive fault detection. **International Journal of Vehicle Design**, v. 54, n. 2, p. 93, 2010.
- SARTORI, I., AMARO, C. A., SOUZA JÚNIOR, M. B., EMBIRUÇU, M. Detecção, diagnóstico e correção de falhas: uma proposição consistente de definições e terminologias. **Ciência e Engenharia**. v.21, n.2, p. 41-53, 2012.
- SWATHI, D.; KUMAR, T. A. ; YASEEN, M.D. **IoT based Condition Monitoring of Generators and Predictive Maintenance**. Proceedings of the 2nd International Conference on Communication and Electronics Systems (ICCES 2017). Índia. Out. 2017.
- TAKBASH, A. M.; FAIZ, J.; EBRAHIMI, B. M. Losses characterization in voltage-fed PWM inverter induction motor drives under rotor broken bars fault. **IEEE Transactions on Magnetics**. v. 49, n. 4, apr 2013.
- WEBB, A. R. **Statistical Pattern Recognition**. 2nd ed. John Wiley & Sons, London, UK, 2002.
- YOKOYAMA, T., OLSSON, M., IZUMI, S., SAKAI, S. Investigation into the self-loosening behavior of bolted joint subjected to rotational loading. **Engineering Failure Analysis**. v.23, p. 35–43, 2012.