



Aplicação de Microcontroladores de Baixo no Desenvolvimento de um Analisador Modular - Módulo de Alinhamento de Eixos

José Sávyo Soares Lira¹, Richard Senko²

RESUMO

O monitoramento e avaliação de máquinas em operação contínua é de vital importância no setor industrial, principalmente considerando a alta concorrência e a busca por produtos de alta qualidade sem aumentar custo de fabricação, porém, a falta de manutenção adequada aumenta possibilidade dos equipamentos sofrerem com falhas ou paradas inesperadas, ocasionando aumento no custo. A manutenção preditiva é usada para antecipar e encontrar esses tipos de problemas antes que causem problemas que levam ao descarte do equipamento. No entanto, para aplicar esse tipo de manutenção, alguns analisadores são utilizados para manter atualizado o estado do maquinário fazendo análises não destrutivas ou coletando informações como vibrações, temperaturas e velocidades de rotação. Investimentos nesses analisadores pode ser comum para grandes indústrias com capital estável, no entanto, para as indústrias de médio e pequeno porte pode ser encarado com um risco para saúde financeira, principalmente em tempos incertos. Aproveitando a atual expansão de microcontroladores e sensores de baixo custo, o objetivo deste trabalho é dar continuidade ao desenvolvimento do analisador modular de baixo custo com a aplicação do módulo de alinhamento de sistemas rotativos. Em projetos passados, já foram implementados os módulos de vibrações, temperatura, velocidade de rotação e balanceamento de sistemas rotativos aplicando o microcomputador Raspberry Pi 3B+.

Palavras-chave: Microcontroladores, modularidade, manutenção preditiva, custo, alinhamento, sistemas rotativos.

¹José Sávyo Soares Lira do <Engenharia Elétrica>, Departamento de <Engenharia elétrica e informática>, UFPA, Campina Grande, PB, e-mail: josesavyo.lira@ee.ufcg.edu.br

²<Richard Senko>, <Professor Orientador>, <Engenharia de Produção>, UFPA, Campina Grande, PB, e-mail: richard.senko@ufcg.edu.br

Aplicação de Microcontroladores de Baixo no Desenvolvimento de um Analisador Modular - Módulo de Alinhamento de Eixos

ABSTRACT

The monitoring and assessment of machines in continuous operation are of paramount importance in the industrial sector, particularly considering the intense competition and the pursuit of high-quality products without increasing manufacturing costs. However, the lack of proper maintenance increases the likelihood of equipment experiencing failures or unexpected shutdowns, resulting in cost escalation. Predictive maintenance is employed to anticipate and detect such issues before they escalate to the point of equipment disposal.. However, to implement this type of maintenance, certain analyzers are employed to keep the machinery's condition up-to-date by conducting non-destructive analyses or collecting information such as vibrations, temperatures, and rotational speeds. Investing in these analyzers may be common for large industries and becomes a risky investment for medium and small-sized industries, particularly in uncertain times. Taking advantage of the current expansion of low-cost microcontrollers and sensors, the objective of this work is to continue the development of the low-cost modular analyzer with the application of the alignment module for rotating systems. In previous projects, the modules for vibrations, temperature, rotational speed, and balancing of rotating systems have already been implemented using the Raspberry Pi 3B+ microcomputer.

Keywords: Microcontrollers, modularity, predictive maintenance, cost, rotary systems.

INTRODUÇÃO

O monitoramento contínuo da condição de máquinas e estruturas críticas é essencial para garantir a operacionalidade ininterrupta e segurança em ambientes industriais, ao mesmo tempo em que reduz custos de manutenção. Esta prática possibilita intervenções proativas, baseadas em diagnósticos precisos do estado dos equipamentos, evitando assim paralisações não planejadas que impactam a produção. No entanto, as soluções de análise convencionais apresentam custos elevados, tornando-as inviáveis para muitas indústrias de pequeno e médio porte.

Neste contexto, o avanço tecnológico dos microcontroladores e a disponibilidade de sensores de baixo custo têm permitido o desenvolvimento de sistemas de monitoramento econômicos. Tais inovações tecnológicas têm sido objeto de estudo e aplicação crescente na criação de equipamentos acessíveis de análise da condição. Este projeto busca expandir essa tendência, com o desenvolvimento continuado de um analisador modular acessível, direcionado para o alinhamento de eixos em sistemas rotativos, bem como para a melhoria dos módulos existentes.

Utilizando o microcontrolador Raspberry Pi 3B+ como núcleo, os módulos desenvolvidos cobrem uma ampla gama de análises críticas, incluindo vibração, temperatura, ultrassom para detecção de falhas, além da medição de velocidades de rotação e procedimentos de balanceamento. A inclusão do módulo de alinhamento de eixos representa um avanço significativo, oferecendo uma alternativa viável às técnicas tradicionais que dependem de relógios comparadores e réguas, as quais podem ser demoradas e cuja precisão frequentemente está atrelada à habilidade do operador. Em contrapartida, os sistemas embarcados com sensores a laser e indutivos, apesar de precisos, são demasiadamente caros para o segmento de mercado alvo deste projeto.

O reconhecimento deste trabalho por meio de patentes e publicações em congressos especializados atesta a importância e o impacto da pesquisa, demonstrando o potencial de contribuição significativa ao setor de monitoramento das condições de máquinas e equipamentos. Com este projeto, visa-se avançar na democratização da tecnologia de monitoramento, fornecendo soluções eficazes e acessíveis para uma gama mais ampla de indústrias.

MATERIAIS E MÉTODOS

Microprocessador Raspberry Pi 3B+

O raspberry pi já foi usado em diversas aplicações, tais como automação de ambientes em salas de aulas inteligentes (Silva, 2019), servidores web com baixo consumo de energia (Aroca et al., 2017), sistemas de Cloud domésticos para armazenamento em nuvem (Silva; Distadio, 2020), também num sistema de monitoramento residencial (Coutinho, 2016).

Como peça fundamental para a construção do analisador modular, escolheu-se o raspberry pi 3 B+ (RPi3B+), Figura 1, apos a comparação com outros microcontroladores através da análise da taxa de amostragem e do nível de sinal e ruído (SNR) (Pessoa e Senko, 2021). Outro quesito importante foi a compatibilidade com sensores de baixo custo e a plataforma de código aberto e amigável para gerar uma boa interação com o usuário. Segundo Jucá e Pereira (2018), o RPi3B+ possui a capacidade de interagir com o mundo exterior através de sensores. Indo além, trabalhando em conjunto com microcontroladores, pode ser usado em uma ampla gama de projetos digitais, como descrito anteriormente.

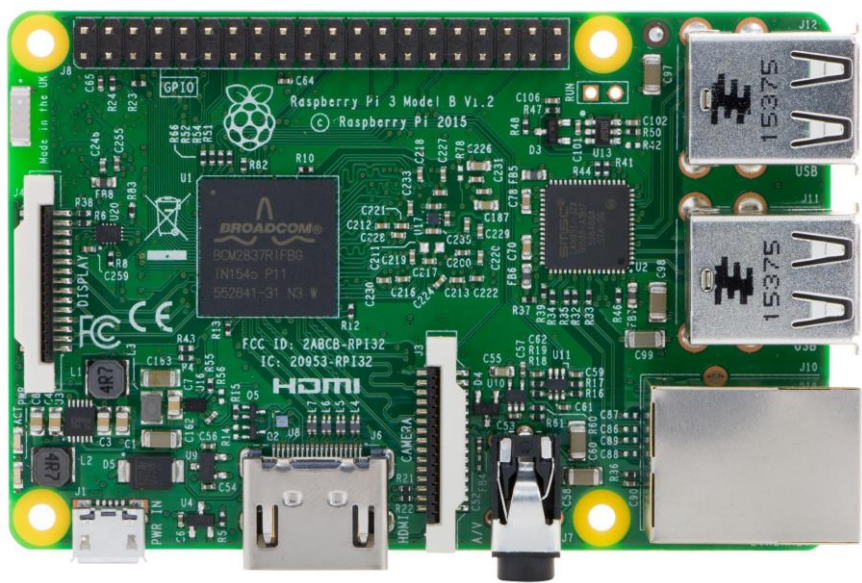


Figura 1 - Raspberry Pi 3B+.

Tabela 1 - Especificações da RPi3B+.

Processador	CORTEX-A53 QUAD-core 64 bits
Clock	1.4 Ghz
Memória	1 GB LPDDR2
Portas USB 2.0	4
Conectividade	Wifi dual band e Bluetooth 4.2/BLE
Slot Cartão	Micro USB

Quantidade de GPIO's (Pinos de entrada IN e saída OUT)	25
Alimentação	5V via USB ou pinos de alimentação

Touchscreen display

Para melhorar o IHM (interface homem máquina) do analisador modular, aplicou-se um display de 7" próprio para o Rpi3B+, Figura 2, proporcionando maior versatilidade para o sistema.



Figura 2 - Tela Touchscreen 7" Raspberry Pi.

Acelerômetro MPU6050

O MPU6050, Figura 3, funciona como um piezoelétrico com o barramento I2C, um tipo de comunicação assíncrona que utiliza dois canais, um para transmissão e recepção e outro para sincronização de dados, essa particularidade foi explorada para encontrar a melhor lógica para adquirir dados de aceleração. Este sensor é conectado ao Rpi3B+ através do barramento I2C.

Utilizado por Mascoloti (2021) no desenvolvimento de sensores de baixo custo para monitorar a saúde estrutural de uma máquina rotativa que obteve uma correlação de 70% entre o MPU6050 e um acelerômetro Tractian, desta forma este sensor foi escolhido para a aplicação. As especificações do MPU6050 foram mostradas na Tabela 2.

O MPU6050 já foi usado em conjunto com o Rpi3B+ em um analisador de vibrações (Sávyo e Senko, 2023).



Figura 3 - Acelerômetro MPU-6050.

Tabela 2 - Especificações do MPU-6050.

Alimentação	Dimensões	Faixa de aceleração	Conexão
3,3 – 5V	20x16mm	$\pm 2, 4, 8$ e 16 g	I2C

Conexão dos sensores na Rpi 3B+

O acelerômetro MPU6050 é conectado através da conexão I2C e alimentado com 5V, a Rpi3B+ possui um barramento I2C, na Figura 4 é mostrado os pinos de conexão desse barramento e a conexão com o display touchscreen, os demais sensores também são alimentados com 5V mas podem ser conectados nas demais GPIO's da Rpi3B+.

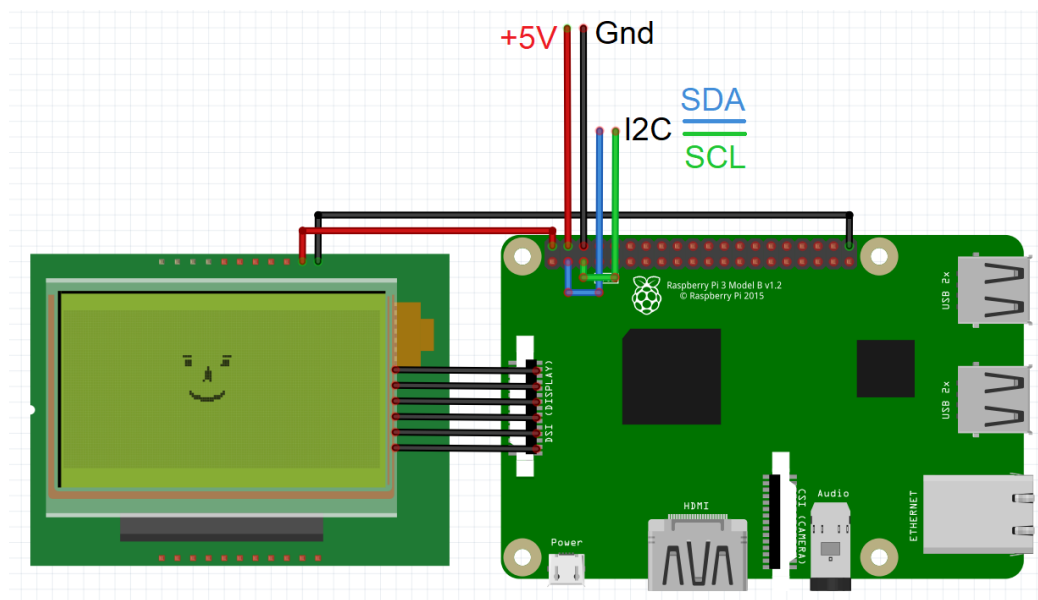


Figura 4 - Conexão I2C da RPi3B+.

Modelagem matemática para aquisição e tratamento dos dados

Mendonza e Zurita (2018) desenvolveram um sistema de alinhamento de eixo , Figura 5, usando um arduíno e sensores indutivos.

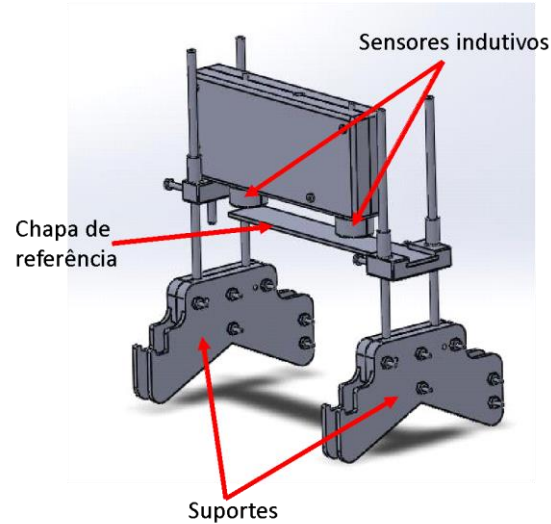


Figura 5 - Sistema de alinhamento, Mendonza e Zurita (2018).

Dessa forma o equipamento é montado de modo que um suporte fique preso no eixo do motor e o outro no eixo do sistema rotativo no qual o motor está acoplado, Figura 6, assim o arduino coleta a distância de cada sensor indutivo até a chapa de referência, para medir a inclinação dos sensores em relação a chapa, a coleta dos dados é feita três vezes, posicionando o equipamento 90° em sentido horário e anti horário da posição inicial.

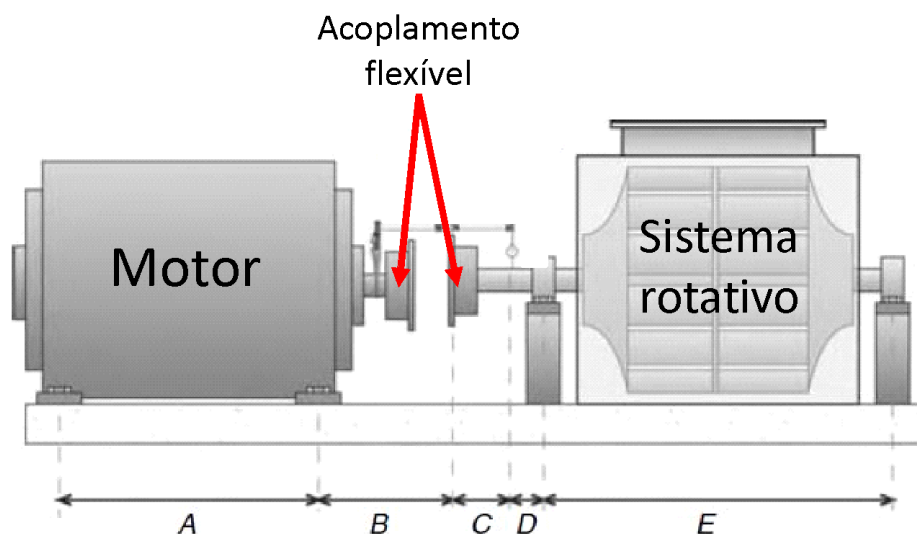


Figura 6 - Montagem do equipamento Mendonza e Zurita (2018).

Coletando as distâncias dos sensores para a chapa e com as medidas de distância de apoios do motor e distância de mancais do sistema rotativo, Mendonza e Zurita (2018) modelaram uma equação para encontrar e corrigir o desalinhamento dos eixos, são essas equações 1 e 2.

$$\text{Deslocamento vertical} = (y_1 + y_2)(D + X)/2D - y_2 \quad (1)$$

$$\text{Deslocamento angular} = (y_1 + y_2)(D + X + A)/2D - y_2 \quad (2)$$

Sendo $X = D$ – **distância entre um sensor indutivo e o centro do acoplamento flexível**, dessa forma os cálculos são feitos de modo que a reta formada pela ligação da ponta dos sensores fique localizada de um plano, como mostra a Figura 7.

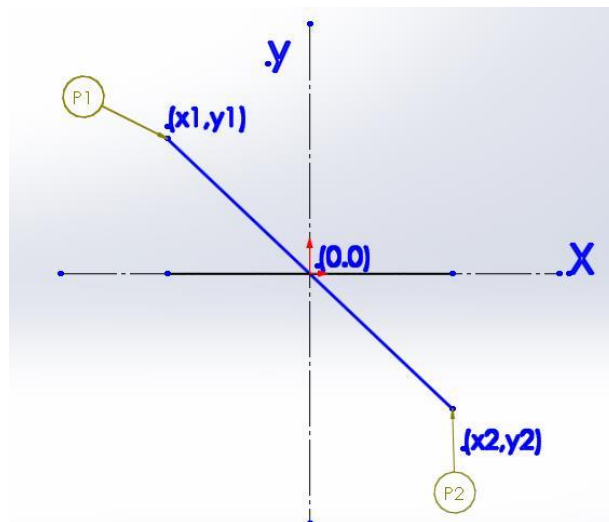


Figura76 - Representação gráfica Mendonza e Zurita (2018).

Assim, exemplificando a reta em azul da Figura 7, seria a posição da chapa de referência e a distância que os sensores coletam são as medidas y_1 e y_2 .

O equipamento desenvolvido por Mendonza e Zurita (2018) utilizava sensores indutivos para medir a inclinação do dispositivo acoplado e calcular seu alinhamento. Visando otimizar o sistema, pensou-se na substituição desses sensores por um único giroscópio integrado ao MPU6050. Com essa alteração, o ângulo de inclinação da reta representada na Figura 8 pode ser obtido de forma mais simples e eficiente. Essa mudança reduz a complexidade e os custos do sistema, mantendo o foco principal da pesquisa em simplificação e viabilidade econômica.

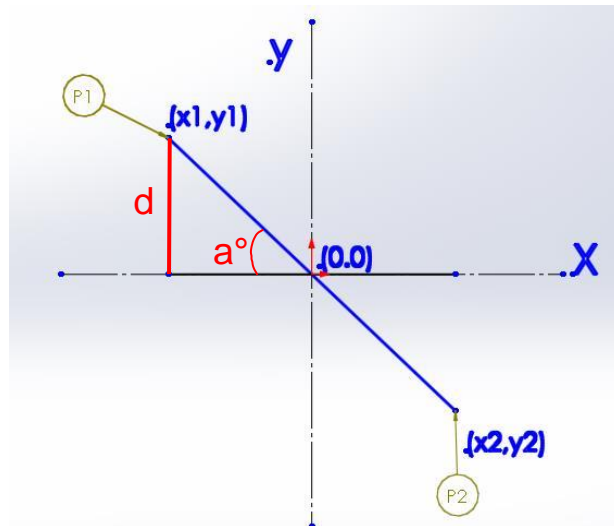


Figura 8 - Ângulo de inclinação do desalinhamento de um sistema rotativo; Adaptado de Mendonza e Zuria (2018).

Tabela 3 - Preço dos sensores.

Sensores	Preço (R\$)
Indutivos x2	81,52
MPU6050	21,76

Logo, com a coleta do ângulo de inclinação **a** é possível descobrir **y1** e **y2** e aplicar nas equações (1) e (2), remodeladas é obtido o seguinte resultado.

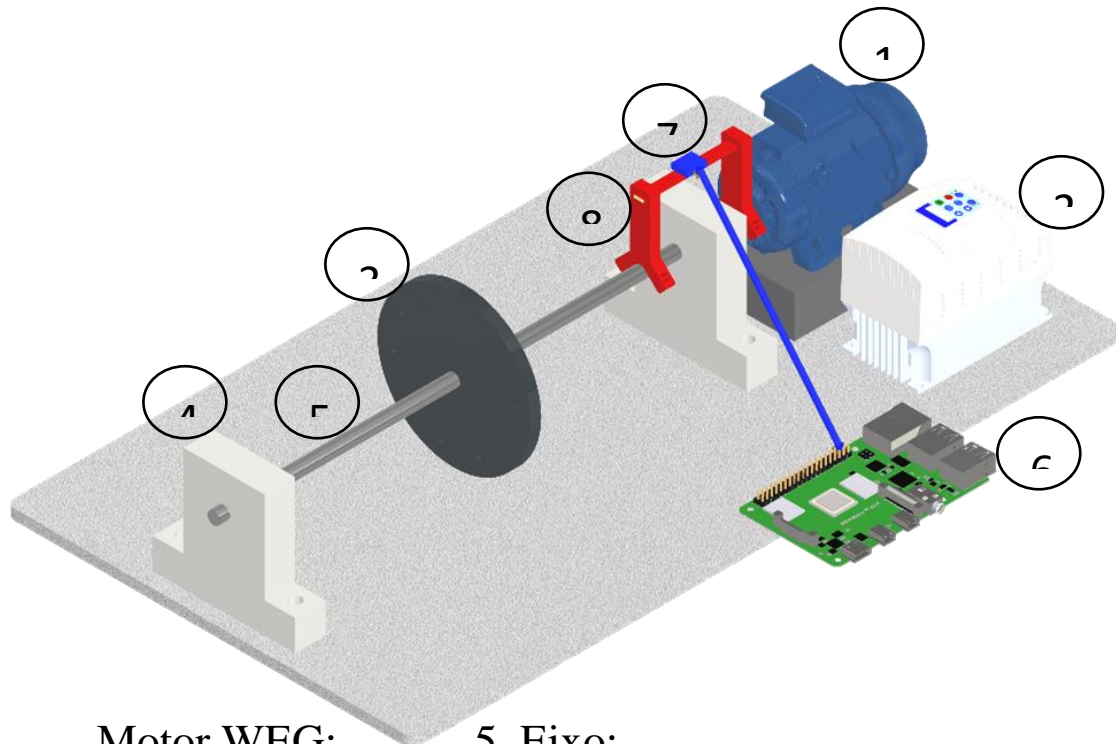
$$\text{Deslocamento linear} = (S \cdot \sin(a) + S \cdot \sin(a + 180^\circ))(D + X) / 2D - S \cdot \sin(a + 180^\circ) \quad (3)$$

$$\text{Deslocamento angular} = (S \cdot \sin(a) + S \cdot \sin(a + 180^\circ))(D + X + A) / 2D - S \cdot \sin(a + 180^\circ) \quad (4)$$

Sendo a variável **S** a distância entre a posição do MPU6050 e onde estariam posicionados os sensores indutivos, o sensor deve ser posicionado bem centro entre a posição dos estariam os sensores indutivos.

Procedimento de validação

Os experimentos foram feitos aplicando o analisador com o módulo desenvolvido junto a um sistema rotativo, Figura 9.

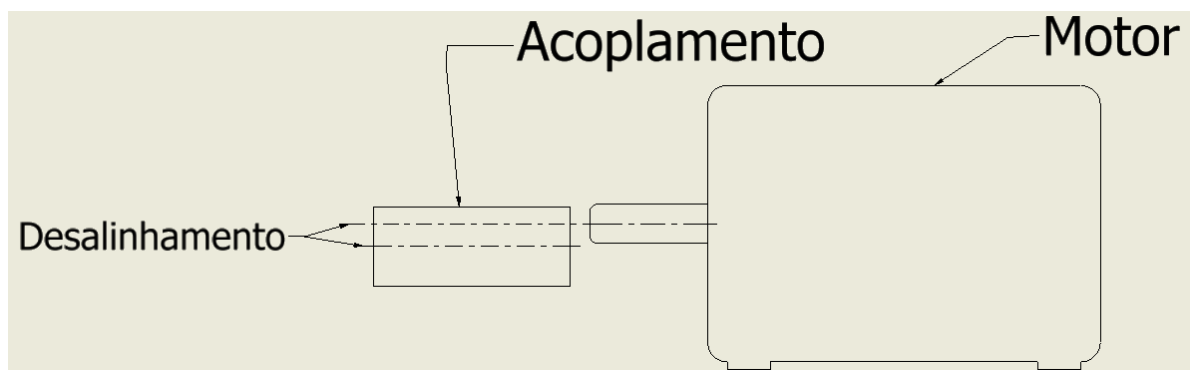


Motor WEG;
Inversor WEG;
Disco;
Mancal;

5. Eixo;
6. Raspberry Pie 3B+;
7. MPU6050;
8. Dispositivo.

Figura 9 - Sistema rotativo.

O sistema rotativo foi submetido a dois tipos de desalinhamento apresentados na Figura 10. O desalinhamento foi aplicado com o auxílio de arruelas de 1mm.



(A)

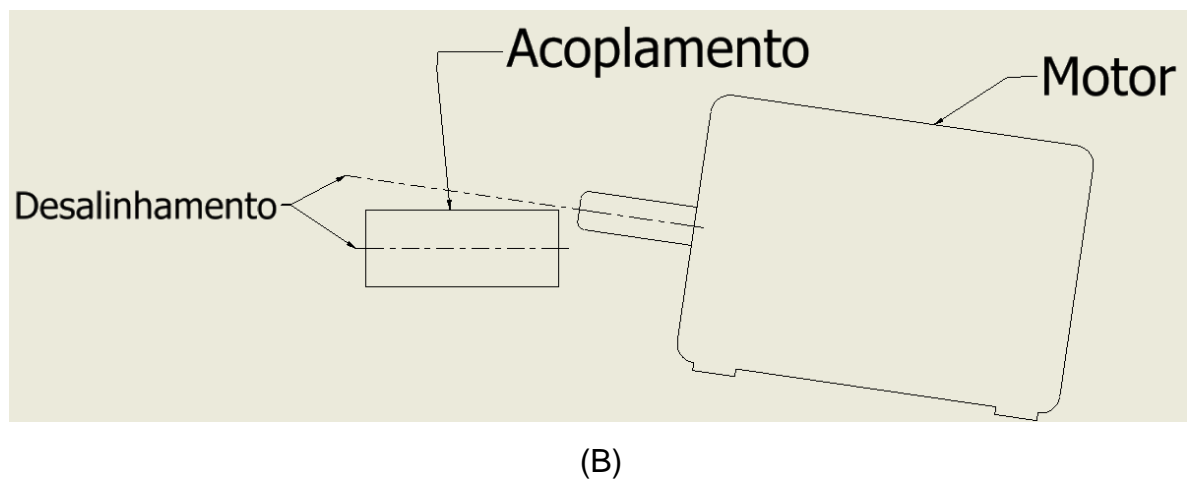


Figura 10 - (A) Desalinhamento Paralelo; (B) Desalinhamento Angular.

Para cada desalinhamento, o procedimento foi o mesmo: o dispositivo foi acoplado e zerado na posição inicial (Figura 11A) para eliminar interferências de instalação. Em seguida, após o módulo realizar a coleta do ângulo, o dispositivo foi colocado na posição 2, a 90° da posição inicial (Figura 11B), e o ângulo de inclinação foi coletado novamente. Por fim, o dispositivo foi posicionado na posição 3, a 180° da posição 2 (Figura 11C), onde foi realizada a última coleta.

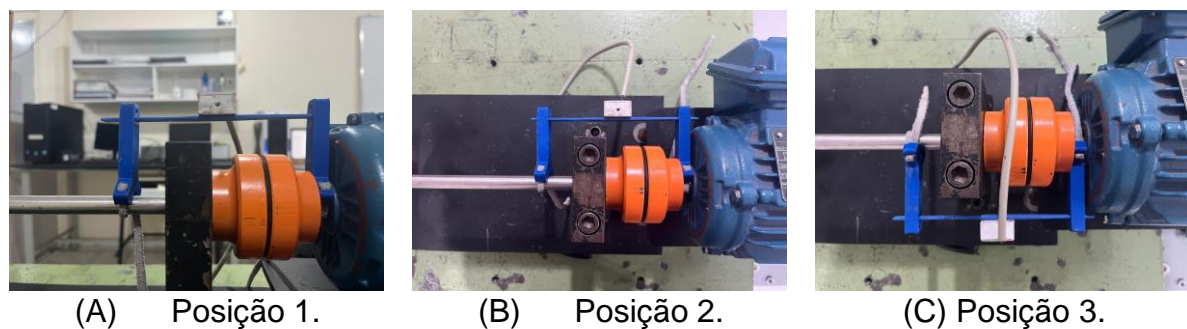


Figura 11 - Etapas de leitura do módulo de alinhamento.

Após a coleta dos dados nas 3 posições, o módulo retorna os valores de correção de deslocamento vertical e angular. Os dados de correção são retornados em relação à posição de medição, ou seja, caso o módulo retorne um deslocamento linear para a posição 1, a correção deve ser feita para a posição 1. Após aplicada a correção, novas leituras devem ser feitas até o alinhamento estar de acordo com a aplicação e a norma adequada.

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Para validar o módulo foram feitas leituras com o módulo de análise de vibração no mancal mais externo do sistema rotativo onde as reações têm maior amplitude. Antes de iniciar os experimentos, foi feita uma análise de vibração a 26 Hz com o sistema sem nenhuma aplicação de desalinhamento para usar de referência, Figura 12, e depois aplicou-se um desalinhamento paralelo, Figura 13

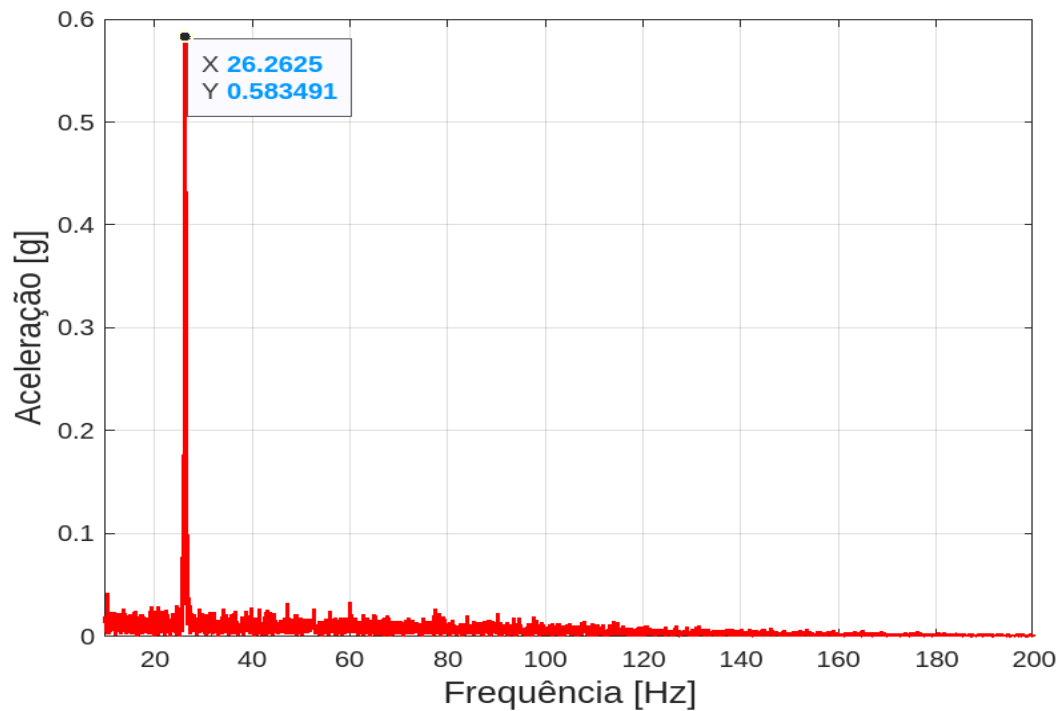


Figura 12 - Resposta do sistema sem a aplicação dos desalinhamentos.

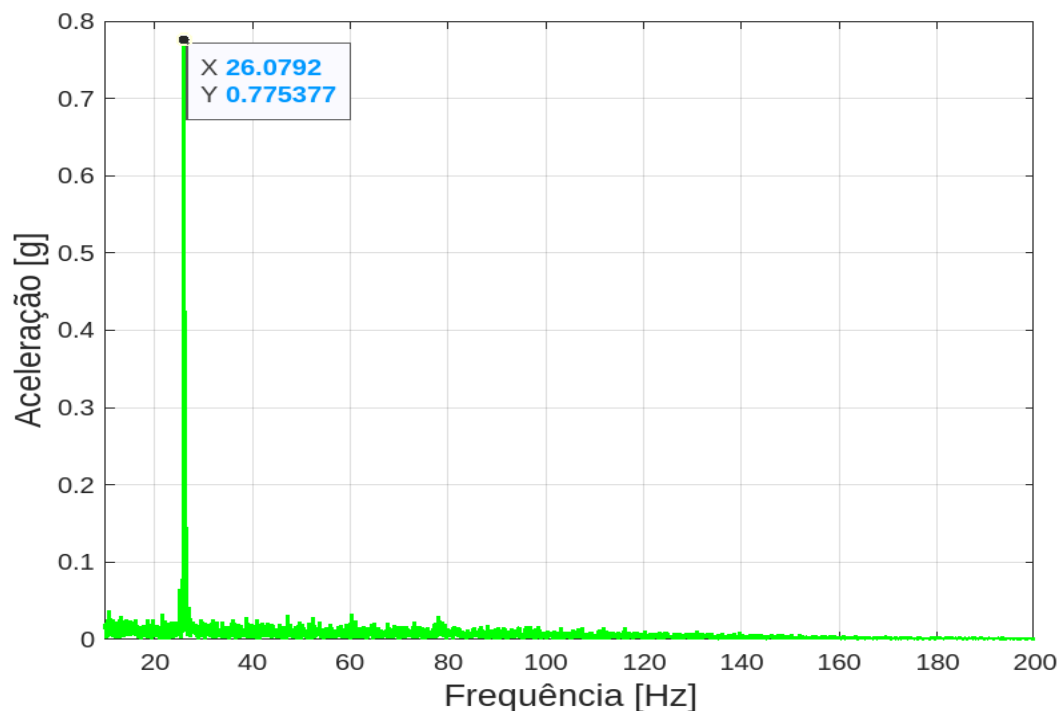


Figura 13 - Resposta do sistema após ser submetido ao desalinhamento paralelo.

O aumento da amplitude na frequência de rotação do sistema rotativo é característica do desalinhamento paralelo.

Aplicando o desalinhamento angular foi obtida a seguinte resposta, Figura 14.

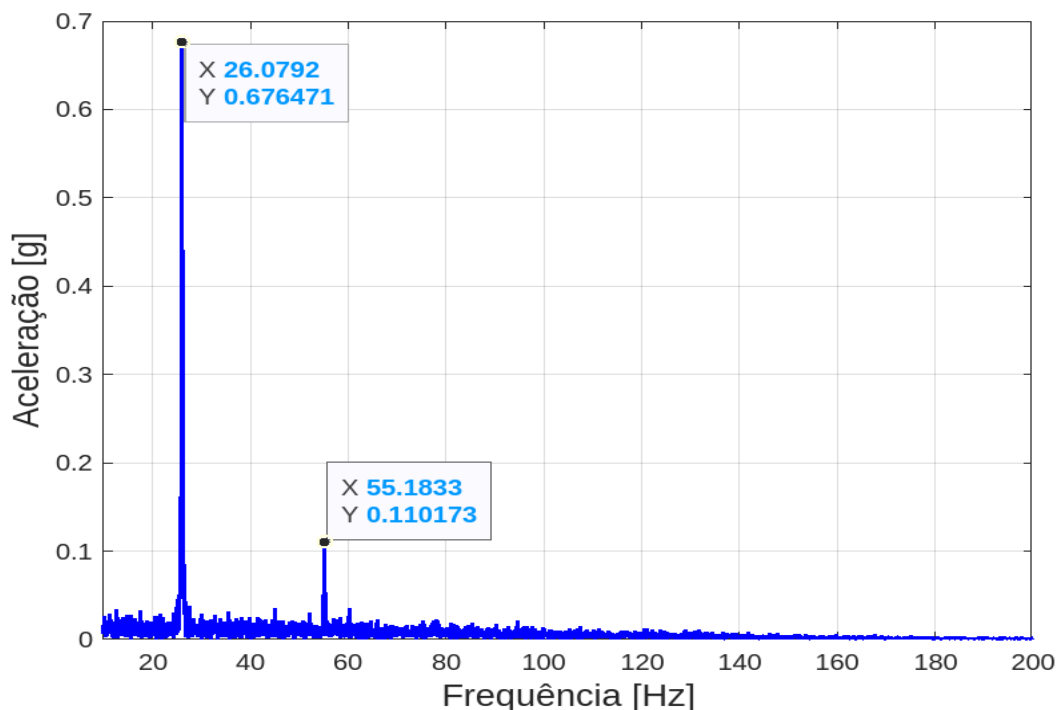


Figura 14 - Resposta do sistema após ser submetido ao desalinhamento angular.

O surgimento de amplitudes significativas em aproximadamente duas vezes a frequência de rotação do sistema rotativo indicam o desalinhamento angular. Os resultados iniciais demonstram que o analisador modular é capaz de mostrar diferenças entre os tipos de desalinhamento, ajudando o usuário a identificar tais problemas.

O software do módulo é bem direto para auxiliar o usuário, o fluxo das janelas do software desenvolvido é apresentado na Figura 15.

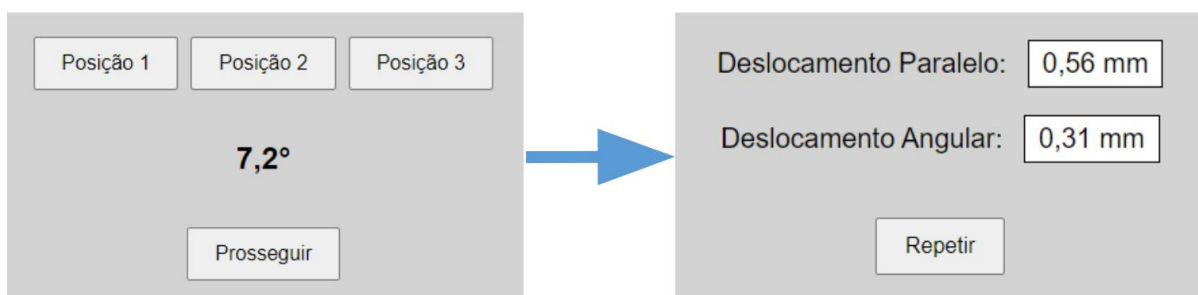


Figura 15 - Fluxo da interface gráfica do software.

Após a correção, seguindo as orientações do analisador modular com o módulo proposto, obteve-se os seguintes resultados, Figura 16.

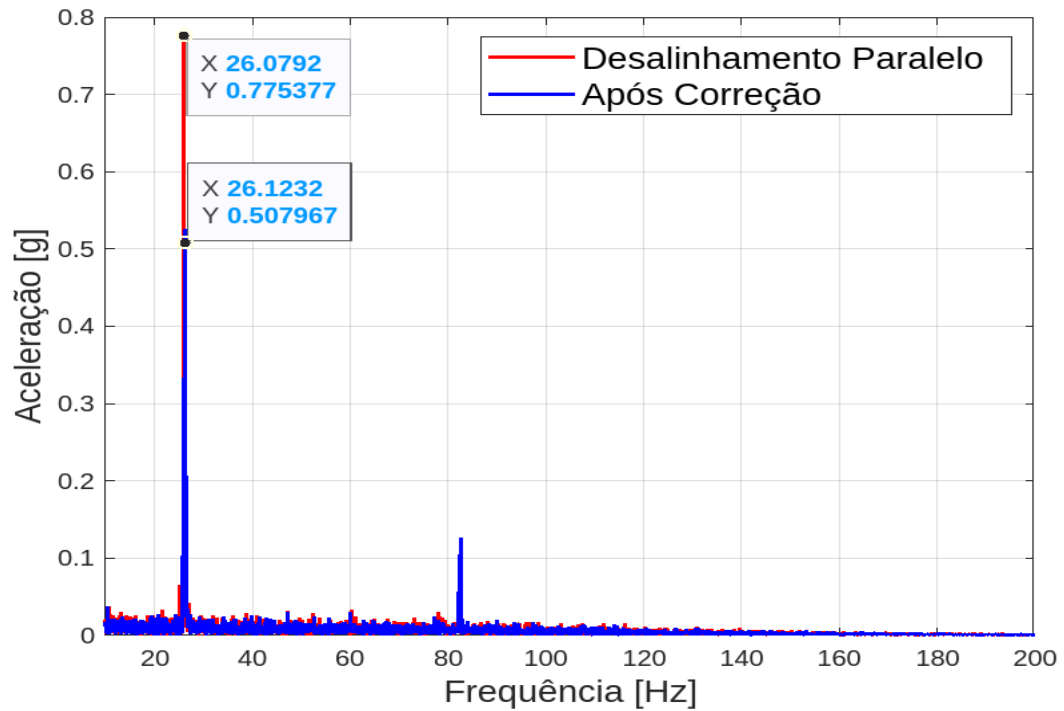


Figura 16 - Comparação do resultado após a correção do desalinhamento paralelo.

A correção reduziu em 34% a resposta de vibração na frequência de rotação, reduzindo o efeito do desalinhamento paralelo no sistema. Segundo Szymon e Pieta (2011), os picos próximos de 3 vezes a frequência de trabalho do sistema rotativo indicam possíveis ressonância no sistema após a aplicação do módulo e correção do desalinhamento

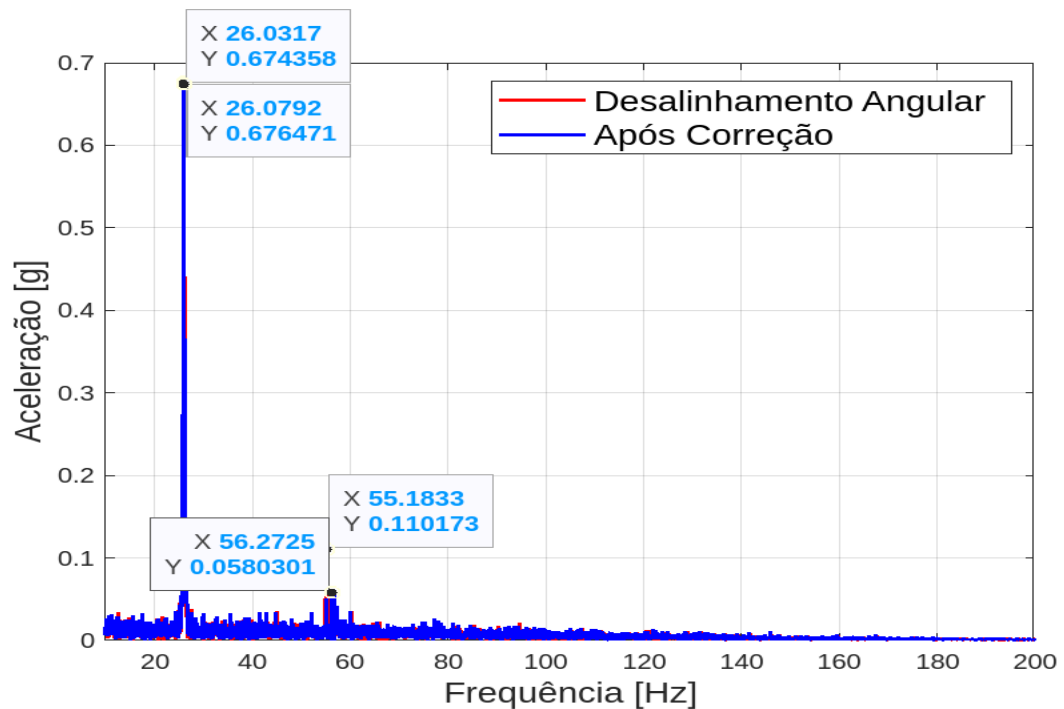


Figura 17 - Comparação do resultado após a correção do desalinhamento angular.

Para o desalinhamento angular a resposta pós correção, Figura 17, apresentou uma redução de 47% no pico de 3x a frequência de rotação reduzindo o efeito de desalinhamento angular do sistema. Para o caso do desalinhamento angular, o mesmo mostrou maior redução e não apresentou outros distúrbios no sistema.

CONCLUSÕES

Com base nos resultados obtidos no aprimoramento do analisador modular de baixo custo desenvolvido, conclui-se que a utilização de tecnologias acessíveis e econômicas representa uma solução viável para a implementação de sistemas de monitoramento e manutenção preditiva em ambientes industriais. O uso do microcontrolador Raspberry Pi 3B+ e o MPU6050 permitiu a criação de um sistema modular capaz de realizar diagnósticos precisos de forma simples e eficaz, tornando a tecnologia acessível para pequenas e médias empresas.

As melhorias introduzidas, como o módulo de alinhamento de eixos e a integração do acelerômetro MPU6050, resultaram em um aumento significativo na capacidade do sistema de identificar diferentes tipos de desalinhamento. A substituição dos sensores indutivos por um giroscópio reduziu custos e simplificou o sistema sem comprometer a eficácia das medições, permitindo que o analisador detectasse desalinhamentos paralelos e angulares com alta precisão, reduzindo em até 47% os efeitos do desalinhamento no sistema.

Os experimentos realizados demonstraram que o analisador modular pode ser aplicado ao alinhamento de sistemas rotativos em máquinas que trabalham com rotações mais elevadas trabalhando até 1300Hz.

CRONOGRAMA DE ATIVIDADES

As atividades realizadas pelo bolsista durante o desenvolvimento do projeto estão apresentadas no Quadro 1.

Tabela 4 - Atividades previstas do projeto.

Etapa	Atividade
1	Revisão bibliográfica e atualização permanente a respeito da aplicação do modulo de alinhamento de eixos
2	Seleção de sensores para o microcontrolador utilizado baseado em critérios predeterminados visando a modularidade do analisador
3	Implementação do módulo de alinhamento de eixos em sistemas rotativos
4	Implementação das novas API's e realização de melhorias na IHM (Interface Homem Máquina) para melhor análise dos dados obtidos

5	Testes experimentais para análise e comparação das atualizações
6	Elaboração de relatórios e publicação de artigos em congressos e revistas especializadas

Com base nas atividades do bolsista, o cronograma de execução do projeto de acordo com cada etapa está resumido no Quadro 2.

Tabela 3 - Cronograma de atividades.

Ano	2023				2024							
Mês	Set	Out	Nov	Dez	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago
1												
2												
3												
4												
5												
6												

REFERÊNCIAS

ADAFRUIT. Products. 2019. Disponível em: < <https://www.raspberrypi.com/products/> >. Acesso em: 18 de set. 2020.

SILVA, C. M. **Sistema de controle de apresentação por meio de Raspberry Pi**. Orientador: Thiago Pirola Ribeiro. 2019. TCC (Graduação) - Universidade Federal de Uberlândia, Monte Carmelo - MG, 2019.

AROCA, Rafael V. *et al.* Servidor web de baixo consumo de energia usando Raspberry-Pi. **Servidor web de baixo consumo de energia usando Raspberry-Pi**, [s. l.], 2017.

SILVA, G. B. F. D.; DISTADIO, R. **Sistema de Cloud doméstico com Raspberry Pi**. Orientador: Prof.(a) Esp. Juliane Borsato Beckedorff Pinto.. 2020. TCC (Graduação) - Faculdade de Tecnologia de Americana, Americana-SP., 2020.

COUTINHO, M. P. **Sistema de monitoramento residencial**. Orientador: MsC Francisco Javier de Obaldia Diaz. 2016. TCC (Graduação) - Faculdade de Tecnologia de Americana, Brasília-DF, 2016.

PESSOA, Sávio Mateus Ferreira; SENKO, Richard. **Application of low-cost microcontrollers for the development of a modular analyzer: vibration and temperature analysis module**. Brazilian Journal of Development, Curitiba, n. 07, p. 75290 -75310, 30 jul. 2021.

JUCÁ, Sandro; PEREIRA, Renata. **Aplicações Práticas de sistemas embarcados Linux utilizando Raspberry Pi**. Rio de Janeiro: PoD Editora, 2018.

Pinto, M.; Gámez, N.; Fuentes, L.; Amor, M.; Horcas, J.M.; Ayala, I. **Dynamic**

Reconfiguration of Security Policies in Wireless Sensor Networks. *Sensors* 2015, **15**, 5251–5280

MELLO, Tiago Chaves; SILVA, Vinícius Ribeiro da. Trabalho Final da Disciplina de Medições Térmicas. **Turbina medidora de vazão**, Porto Alegre, 2010.

MASCOLOTI, Gabriela Tavares. **Desenvolvimento e aplicação de módulo de sensoriamento de baixo custo para o monitoramento de saúde estrutural de máquina rotativa.** Orientador: Dr. Sidney Bruce Shiki. 2021. TCC (Graduação) - UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS, São Carlos - SP, 2021.

LIRA, José; SENKO, Richard. Application of Low-Cost Microcontrollers for Temperature and Speed Analysis in Rotating Systems. **Cobem 2023**, Florianópolis, nov. 2023.

MENDONZA, Iván; ZURITA, Grover. SHAFT ALIGNMENT MEASUREMENT SYSTEM DEVELOPED FOR INDUSTRIAL APPLICATIONS DESARROLLO DE UN SISTEMA DE MEDICIÓN DE ALINEACIÓN DE EJES PARA APLICACIONES INDUSTRIALES. **INVESTIGACIÓN & DESARROLLO**, Cochabamba-Bolivia, 5 maio 2018.