



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE  
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E EXTENSÃO  
COORDENAÇÃO DE PESQUISA**

**RELATÓRIO DE ATIVIDADES DO ALUNO**

**Programa: PIBITI**

**Título do Projeto: Aplicação de microcontroladores de baixo custo no desenvolvimento de um analisador modular – Módulo de alinhamento de eixos**

**Aluno: José Sávyo Soares Lira**

**Orientador: Richard Senko**

José Sávyo Soares Lira

Assinatura do(a) aluno(a):

\_\_\_\_\_  
Assinatura do(a) orientador(a):

\_\_\_\_\_  
Local e Data

## **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 de 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 de 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.

## **Objetivos**

Desenvolver e integrar um módulo de alinhamento de eixos em sistemas rotativos a um analisador modular de baixo custo, utilizando o microcontrolador Raspberry Pi 3B+ (RPi3B+), visando melhorar a precisão e eficiência da análise de condição de máquinas e equipamentos em indústrias de pequeno e médio porte.

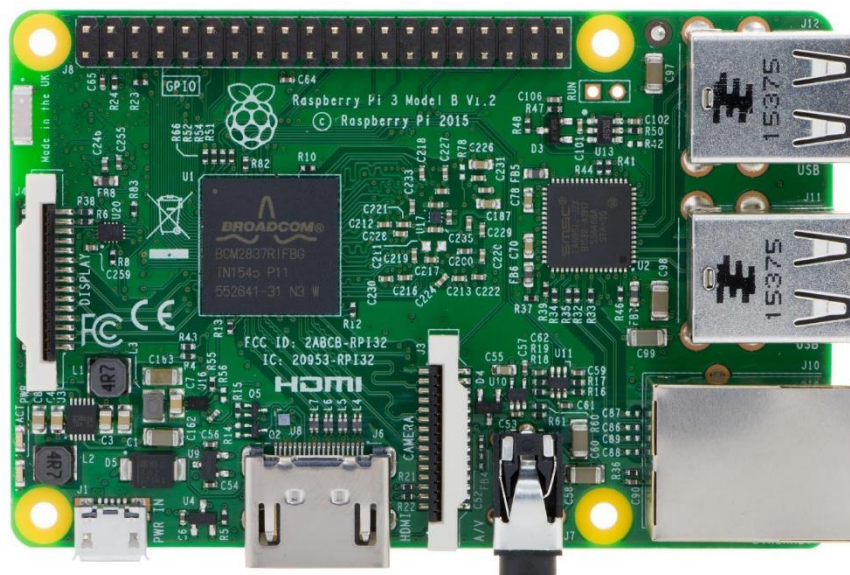
- Analisar a viabilidade da aplicação do módulo de alinhamento de eixos em sistemas rotativos no contexto do analisador modular;
- Pesquisar e selecionar os tipos de sensores compatíveis com a Raspberry Pi 3B+ e com um custo acessível para a aplicação do módulo de alinhamento de eixos;
- Desenvolver e atualizar as API's (Application Programming Interface) e a IHM (Interface Homem Máquina) para a integração do módulo de alinhamento de eixos ao analisador modular;
- Realizar testes, validações e comparações para aferir a precisão e eficiência do módulo de alinhamento de eixos em sistemas rotativos;
- Elaborar manuais e documentação técnica para disseminação do conhecimento e replicação do projeto em outras indústrias.

## **Material e métodos/Metodologia**

### **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, no desenvolvimento de um módulo de análise de vibrações e temperatura (Pessoa e Senko, 2021) e velocidade de rotação (Sávyo e Senko, 2023). Isso se deve a compatibilidade com sensores de baixo custo e a plataforma de código aberto e amigável para gerar uma boa interação com o usuário do sistema. 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 uso amigável do sistema.



**Figura 2** - Tela Touchscreen 7" Raspberry Pi.

## Acelerômetro MPU6050

O MPU6050, Figura 3, funciona como um trabalho 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, 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).



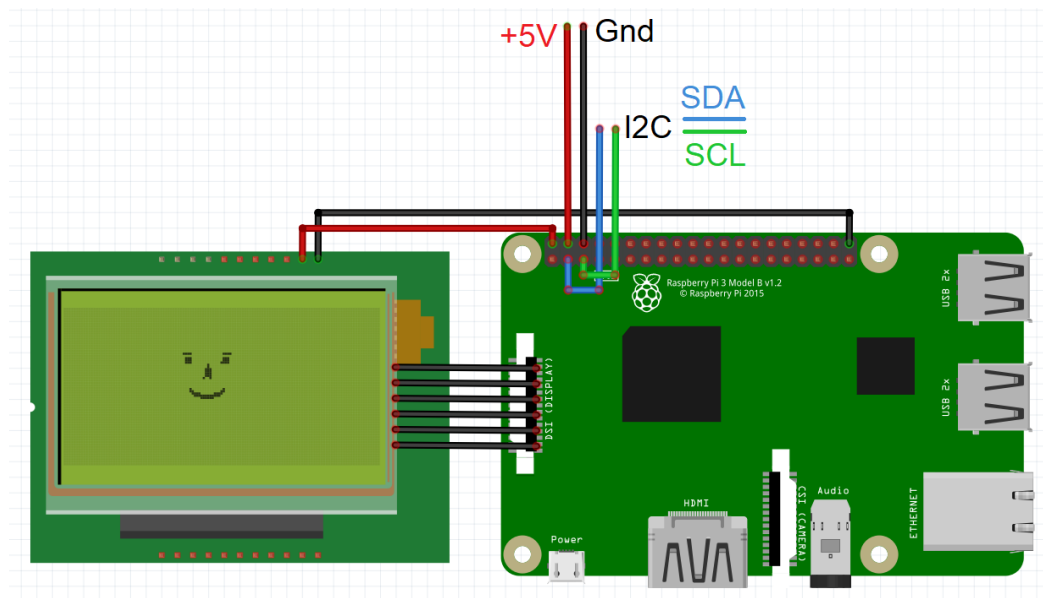
**Figura 3** - Acelerômetro MPU-6050.

**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+

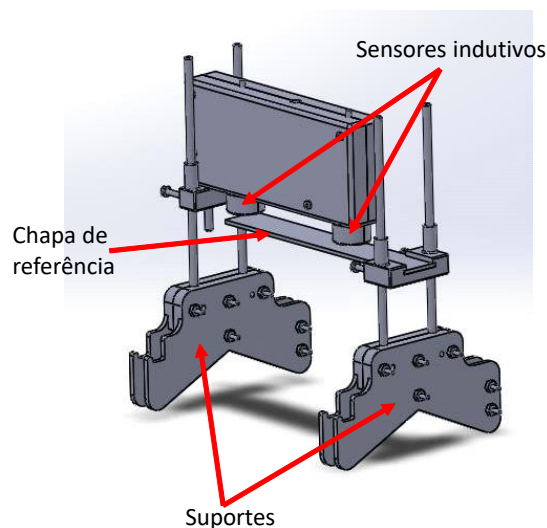
O acelerômetro MPU6050 é conectado através da conexão I2C e alimentado com 5V, a Rpi3B+ possui um barramento I2C, na Figura 4 é mostrado os pinos de conexão desse barramento e a conexão com o display touchscreen, os demais sensores também são alimentados com 5V mas podem ser conectados nas demais GPIO's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



**Figura 4** - Conexão I2C da RPi3B+.

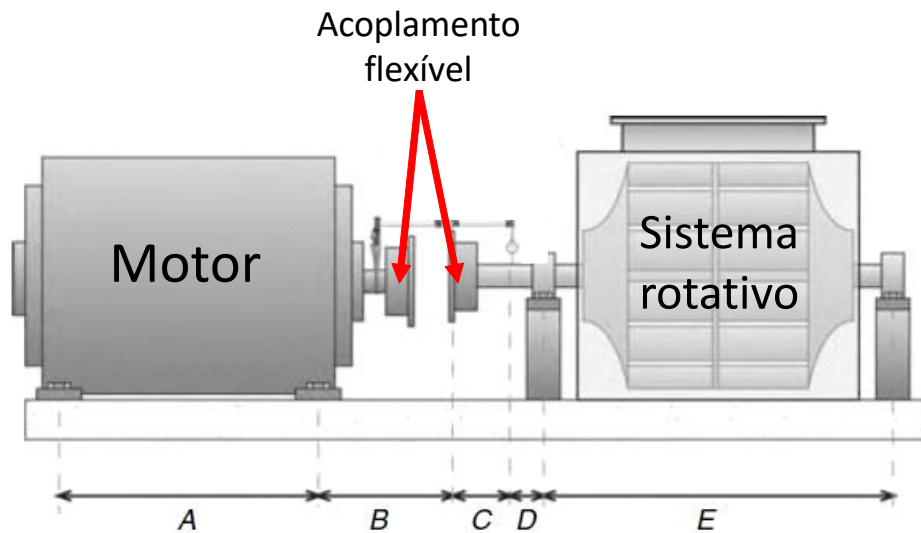
## Modelagem matemática para aquisição e tratamento dos dados

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



**Figura 5** - Sistema de alinhamento. Fonte: 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 à chapa. A coleta dos dados é realizada três vezes, posicionando o equipamento a 90° em sentido horário e anti-horário a partir da posição inicial.



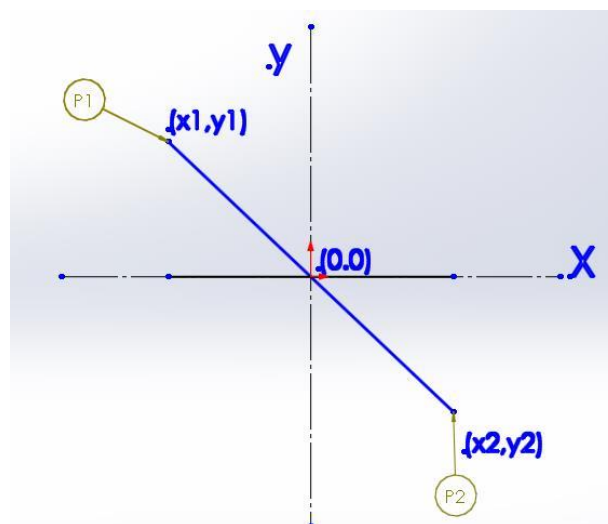
**Figura 6** - Montagem do equipamento. Fonte: Mendonza e Zurita (2018).

A partir da coleta das distâncias dos sensores até a chapa e das medidas das distâncias de apoios do motor e dos mancais do sistema rotativo, Mendonza e Zurita (2018) desenvolveram equações (Equações 1 e 2) para identificar e corrigir o desalinhamento dos eixos.

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

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

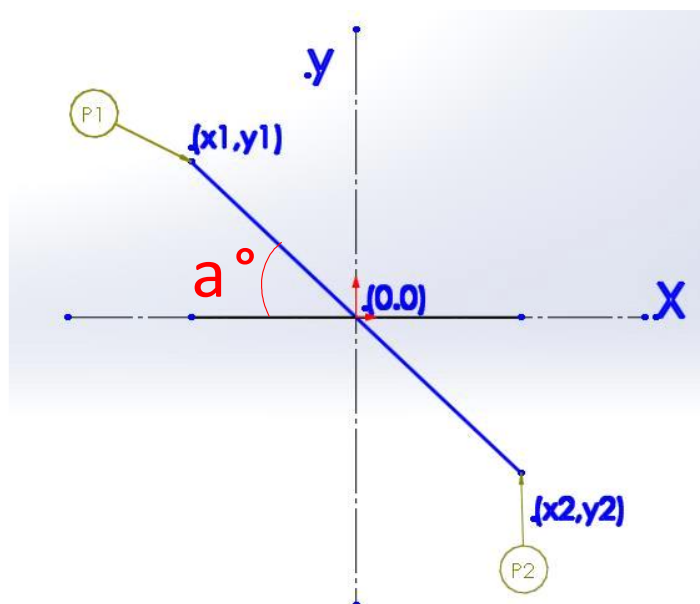
Sendo  $X = D - F$ , e  $F$  a distância horizontal entre um sensor indutivo e o centro do acoplamento flexível, dessa forma os cálculos são feitos de modo que a reta que conecta as extremidades dos sensores esteja situada em um plano, como ilustrado na Figura 7.



**Figura 7** - Representação gráfica. Fonte: Mendonza e Zurita (2018).

Assim, exemplificando a reta em azul da Figura 6, seria a posição da chapa de referência e as distâncias que os sensores coletaram são as medidas  $y_1$  e  $y_2$ .

Sabendo que o equipamento desenvolvido por Mendonza e Zurita (2018), inicialmente foi pensado na substituição dos sensores indutivos por apenas um giroscópio presente no MPU6050, logo com apenas um giroscópio é possível coletar o ângulo de inclinação da reta representada na Figura 8, simplificando e reduzindo o custo do sistema, conforme o foco da pesquisa.



**Figura 8** - Repratação Mendonza e Zurita (2018) com ângulo de inclinação.

**Tabela 1** - Preço dos sensores.

Sensores	Preço (R\$)
Indutivos 2x	81,52
MPU6050	21,76

Logo, com a coleta do ângulo de inclinação  $a$  é possível descobrir  $y_1$  e  $y_2$  e aplicar nas equações (1) e (2), desta forma obtém-se o seguinte resultado.

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

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



Sendo a variável **S** a distância entre a posição do MPU6050 e onde estariam posicionados os sensores indutivos. O MPU6050 deve ser posicionado bem no centro, entre onde os sensores indutivos estariam posicionados.

## Resultados parciais

Utilizamos dados do estudo de Mendonza e Zurita (2018) para validar nossas modelagens matemáticas, com o objetivo de replicar seus resultados. Esse procedimento teórico é crucial para a aplicação prática do nosso projeto. No âmbito experimental, Mendonza e Zurita (2018) testaram seu equipamento em um sistema rotativo, detalhando as seguintes medidas:

**Tabela 2-** Medidas em mm do sistema rotativo utilizado por Mendonza e Zurita (2018).

A	160
B	75
C	118
D	59
S	120
X	D-S

**Tabela 3** - Coleta do experimento 1 de Mendonza e Zurita (2018).

	<b>Coleta 1</b>	<b>Coleta 2</b>	<b>Coleta3</b>
<b>Y1</b>	2,93	3,17	3,59
<b>Y2</b>	3,53	4,25	2,67

**Tabela 6** - Coleta do experimento 2 de Mendonza e Zurita (2018).

	<b>Coleta 1</b>	<b>Coleta 2</b>	<b>Coleta3</b>
<b>Y1</b>	2,9	3,2	3,5
<b>Y2</b>	3,6	4,2	2,5

**Tabela 4** - Coleta do experimento 3 de Mendonza e Zurita (2018).

	<b>Coleta 1</b>	<b>Coleta 2</b>	<b>Coleta3</b>
<b>Y1</b>	2,9	3,2	3,4
<b>Y2</b>	3,6	3,0	3,7

**Tabela 5** - Resultados e comparação do experimento 1.

<b>Experimento 1</b>	<b>Mendonza e Zurita (2018)</b>	<b>Esta pesquisa</b>	<b>Erro (%)</b>
<b>Correção vertical</b>	-3,6	-3,59	0,002
<b>Correção angular</b>	5,48	5,50	0,003

**Tabela 9** - Resultados e comparação do experimento 2.

<b>Experimento 2</b>	<b>Mendonza e Zurita (2018)</b>	<b>Esta pesquisa</b>	<b>Erro (%)</b>
<b>Correção vertical</b>	-3,7	-3,54	0,043
<b>Correção angular</b>	5,5	5,45	0,009

**Tabela 10** - Resultados e comparação do experimento 3.

<b>Experimento 3</b>	<b>Mendonza e Zurita (2018)</b>	<b>Esta pesquisa</b>	<b>Erro (%)</b>
<b>Correção vertical</b>	-3,7	-3,54	0,043
<b>Correção angular</b>	5,5	5,40	0,018

Os resultados desta investigação originaram-se da execução de um script Python, que incorporou as equações 3 e 4 conforme modeladas, além de integrar parâmetros baseados nas leituras de Mendonza e Zurita (2018). Na fase preliminar do estudo, uma metodologia específica foi escolhida e submetida a uma validação matemática rigorosa. Os insights adquiridos nesse processo preparatório serão aplicados no desenvolvimento subsequente do módulo de alinhamento de eixos para o nosso analisador modular.

## 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.