



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

RELATÓRIO DE ATIVIDADES DO ALUNO

Programa: PIBITI

Título do Projeto: Aperfeiçoamento do analisador modular de baixo custo em desenvolvimento

Aluno: José Sávyo Soares Lira

Orientador: Richard Senko

_____ Assinatura

do(a) aluno(a):

Assinatura do(a) orientador(a):

Local e Data

Introdução

A prática de monitoramento de máquinas e estruturas críticas é essencial para aumentar a disponibilidade dos equipamentos, manter um baixo custo de manutenção e segurança da planta, e evitar atrasos na produção devido a paradas inesperadas. Para obter dados da condição da máquina, são utilizados analisadores que podem obter sinais de vibração, temperatura, rotação, entre outras informações necessárias. No entanto, o alto custo desses equipamentos pode ser um investimento inviável para indústrias de pequeno ou médio porte, principalmente em períodos de instabilidades econômicas.

Com o avanço no desenvolvimento dos microcontroladores e sensores de baixo custo, tornando-os cada vez mais precisos e acessíveis, as aplicações destes no desenvolvimento de dispositivos de monitoramento de máquinas e equipamentos vem atraindo inúmeras pesquisas. Em projetos anteriores, aplicou-se o microcontrolador Raspberry Pi 3B+ no desenvolvimento de um analisador modular, no qual, seguindo os princípios da modularidade, desenvolveu-se os módulos de análise de amplitudes de vibração, temperatura, análise de trincas e descontinuidades através de ultrassom, análise de velocidades de rotação (tacômetro) e balanceamento de sistemas rotativos.

No entanto, com a crescente evolução tecnológica e visando a natural evolução deste de protótipo para produto, um refinamento dos módulos já desenvolvidos é de suma importância para o projeto em andamento. Este trabalho tem como propósito dar continuidade no desenvolvimento de um analisador modular de baixo custo, focando no aperfeiçoamento dos módulos já desenvolvidos e na melhoria da IHM (Interface Homem Máquina), visando uma melhor precisão quando comparado com equipamentos de bancada, facilitar a leitura do usuário e dar início à transformação deste protótipo para um produto.

A pesquisa é de grande importância para a indústria, pois permite a adoção de tecnologias de monitoramento de máquinas e equipamentos a um custo acessível, mesmo para empresas de pequeno e médio porte.

Objetivos

Dar continuidade no desenvolvimento de um analisador modular, utilizando o Raspberry Pi3B+ (Rpi3B+) com o aperfeiçoamento dos módulos de análises já aplicados.

- Avaliar se os atuais sensores necessitam de alteração, baseado em critérios como custo, disponibilidade no mercado, facilidade de montagem, sensibilidade e qualidade na obtenção dos sinais;
- Avaliar e atualizar as API's (Application Programming Interface) e a IHM (Interface Homem Máquina) desenvolvidas até o momento;

- Aplicar o conceito de Plug and Play (PnP) na melhoria da forma de conexão dos sensores utilizados junto a Rpi3B+;
- Realização de testes experimentais para avaliação das melhorias aplicadas.

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). 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.

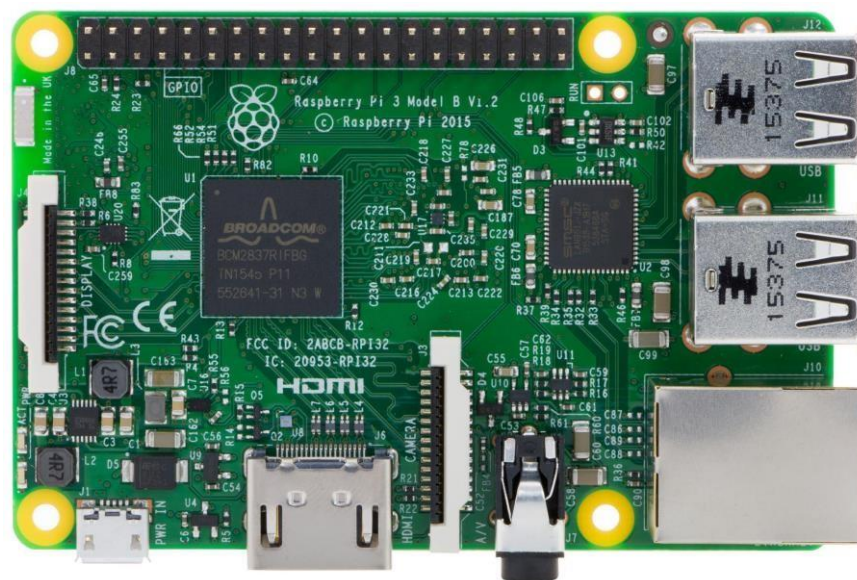


Figura 1 - Raspberry Pi 3B+.

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.

Sensores

Fuentes (2015), descreve um sensor como um dispositivo que converte uma grandeza física em qualquer em outro sinal que possa ser transmitido para um elemento atuador. Os sensores podem ser interpretados por microprocessadores e ter seus sinais tratados e usados para definir ações para determinada aplicação. Para sua seleção é necessário conhecer bem o tipo de atividade a ser desempenhada e as condições do ambiente.

Acelerômetro MPU6050

O MPU6050, Figura 2, 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 está 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.



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

Sensor de temperatura MLX90614

O MLX90614, Figura 3, é um sensor de temperatura infravermelho, usado para medições sem contato. Funciona com o barramento I2C, um tipo de comunicação assíncrona que utiliza dois canais, um para transmissão e recepção e outro para sincronização de dados. Utilizado por Silva, Duarte e Borloti (2021) para avaliação de temperatura corporal sem contato, por Hoffmann (2021) no controle de acesso automático por medição corporal e também por Pessoa e Senko (2021) no desenvolvimento de um analisador modular de vibrações e temperatura, obtendo um erro médio de 5,9% em comparação com um termômetro infravermelho comercial.

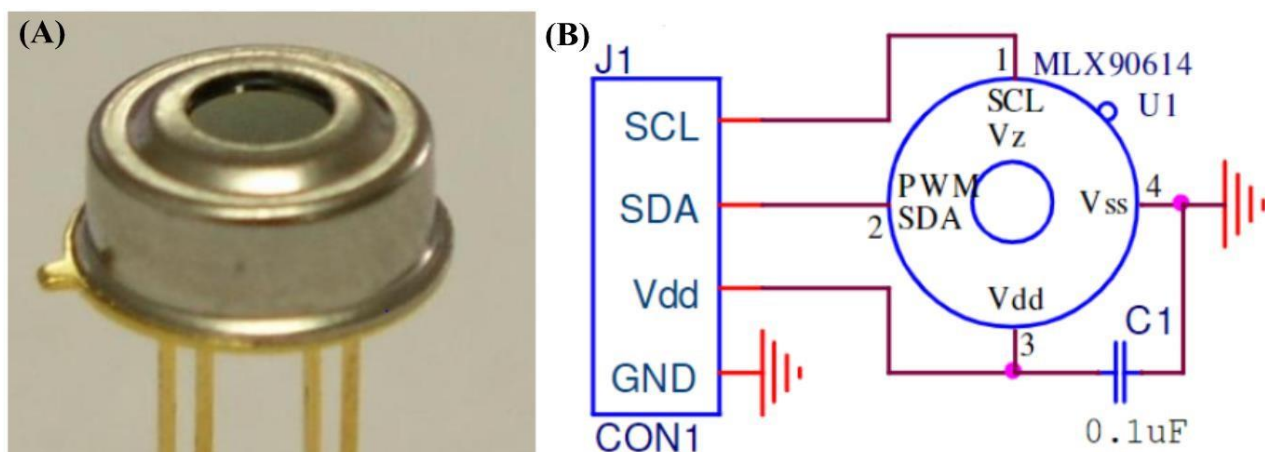


Figura 4 - Sensor de temperatura MLX90614, (A) MLX90614; (B) Conexão para SMBus.

Módulo Ultrassônico HC-SR04

O módulo ultrassônico HC-SR04 Figura 5 foi selecionado anteriormente para o módulo de análise de trincas e descontinuidades devido a utilizar o efeito piezoelétrico para emitir e receber sinais de ultrassom a partir de um circuito integrado e dois transdutores piezoelétricos. O módulo é capaz de emitir um sinal 40 kHz de frequência e utilizar uma saída digital para indicar recepção do sinal ultrassônico, possibilitando o cálculo de distâncias e outros tipos de análises. As especificações do HC-SR04 foram mostradas na Tabela 3.

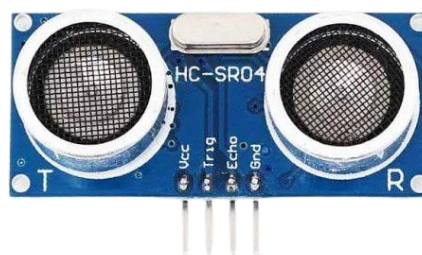


Figura 5 - Módulo ultrassônico HC-SR04.

Tabela 3 - Especificações HC-SR04.

Alimentação	5 V
Corrente	15 mA
Frequência de trabalho	40 kHz
Faixa de distância	0.02 – 4 m
Ângulo de medição	15 Graus
Sinal de entrada no Trigger	Pulso de 10 us
Dimensões	45x20x15mm

Sensor Infravermelho E18D80NK

O sensor IR E18-D80NK, Figura 6, como este já demonstrou bons resultados em aplicações como em contagem de pessoas para registro de fluxo (Salgado, 2019), apresenta-se como uma boa alternativa para a aplicação em questão. Na Tabela 2 são apresentadas as suas principais características.

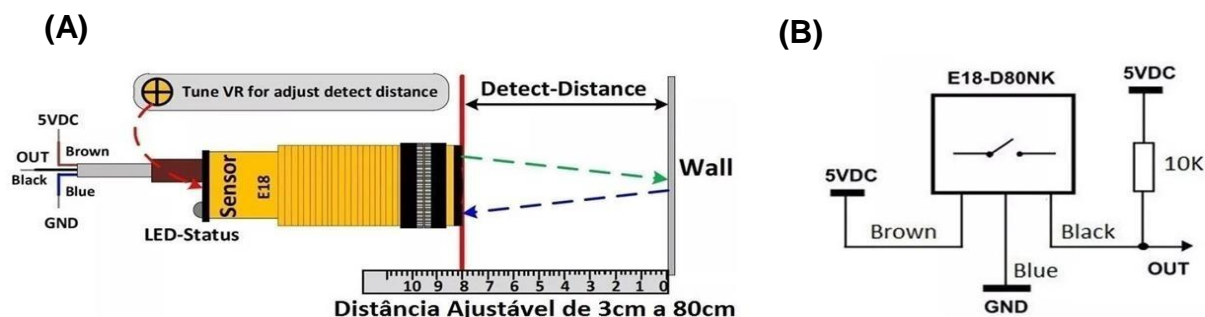


Figura 6 - Sensor infravermelho E18D80NK, (A) Faixa de aplicação; (B) Esquema elétrico.

Tabela 2 – Especificações dos Sensores utilizados.

Tensão de entrada	Consumo de corrente	Dimensões	Tipo de detecção	Alcance	Saída
3,3 – 5V	10-20mA	37x14mm	Reflexivo difuso	3 à 50cm	NPN*

*Os sensores com saída NPN possuem uma junção negativo positivo negativo, dessa forma quando o sensor é acionado ele emite um sinal de nível lógico baixo.

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 7 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+.

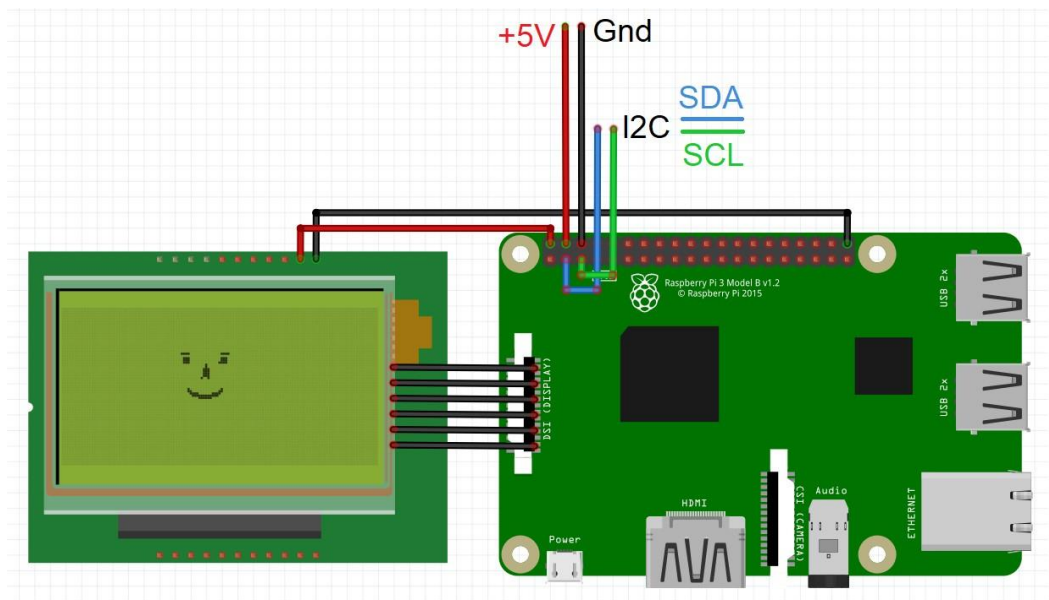


Figura 7 - Conexão I2C da RPi3B+.

Procedimento experimental

Os experimentos foram feitos da seguinte forma, para os módulos de análise de vibração, temperatura, velocidade de rotação e balanceamento de sistemas rotativos, os módulos foram aplicados no sistema rotativo Figura 8, foram coletados dados de vibração nos mancais a velocidade do eixo e a temperatura dos rolamentos.

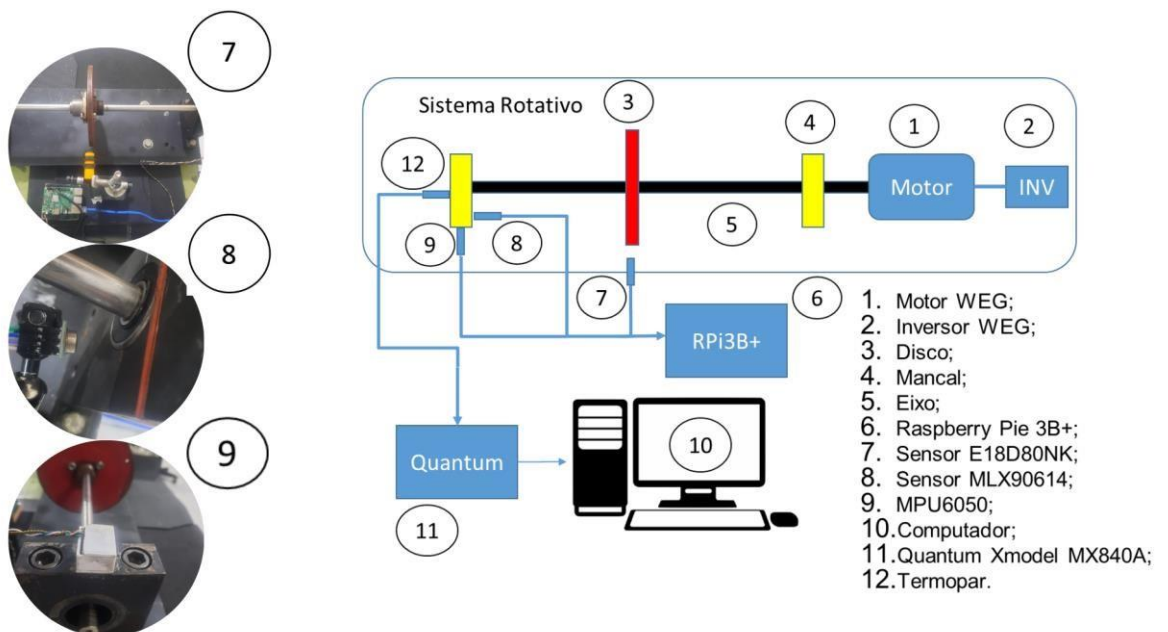


Figura 8 – Sistema rotativo.

Resultados parciais Módulo de análise de vibração

Na aplicação módulo de análise de vibração o sistema rotativo foi excitado com duas frequências (25 e 50 Hz), para cada frequência o sistema foi desbalanceado com 1, 2 e 4 gramas para testar a sensibilidade e a capacidade de identificar os desequilíbrios implementados.

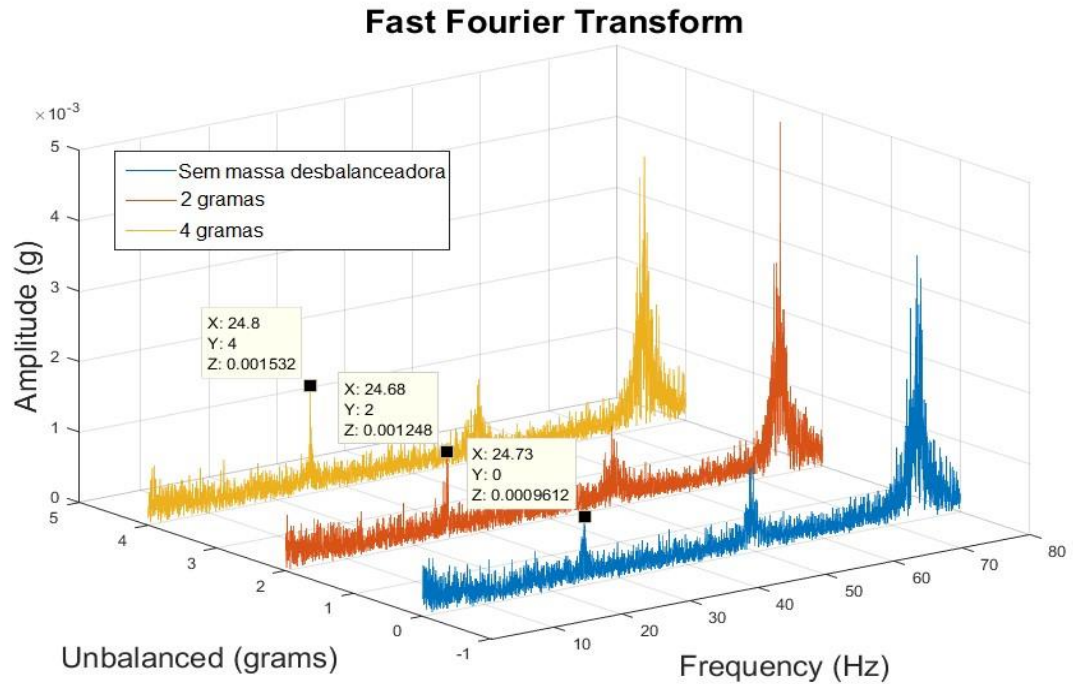


Figura 9 - Resultado da coleta com o sistema a 1452 Hz, (Azul) Sistema livre de massas desbalanceadas; (Laranja) Sistema desbalanceado com 2 gramas; (Amarelo) Sistema desbalanceado com 4 gramas.

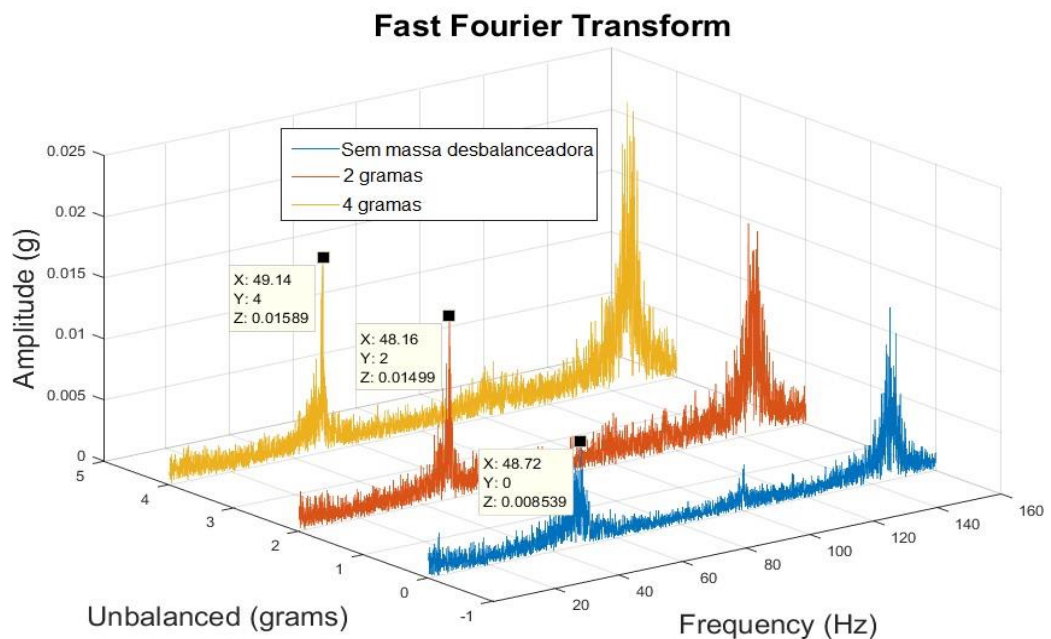


Figura 10 - Resultado da coleta com o sistema a 2948 Hz, (Azul) Sistema livre de massas desbalanceadoras; (Laranja) Sistema desbalanceado com 2 gramas; (Amarelo) Sistema desbalanceado com 4 gramas.

A diferença entre os dados coletados com o sistema desbalanceado com o sistema livre foi calculada para que seja possível verificar se o módulo está detectando o desequilíbrio implementado, esses dados são apresentados na Tabela 3. Outros picos estão bem aparentes localizados a 2x e 3x a frequência de rotação, segundo Scheffer (2004) isso caracteriza uma montagem desalinhada do sistema rotor.

Tabela 3 – Resultado do experimento 1.

Velocidade de rotação (RPM)	Massa desbalanceadora (gramas)	Reações no mancal (m/s ²)	Diferença de aceleração com dados do sistema sem massa adicional (%)
1452	0	0.00883	-
1452	2	0.01079	22.20
1452	4	0.01570	77.80
2948	0	0.07852	-
2948	2	0.13742	75.01
2948	4	0.16422	109.14

Os resultados mostram que o módulo é sensível o suficiente para identificar essas avarias no sistema rotativo tanto na adição de 2 e quatro 4 gramas de massa desbalanceadas no sistema.

O módulo também foi colocado à prova para uma rampa de aceleração do sistema de 0 a 50 Hz em 30 segundos, sem desbalanceamentos no sistema rotativo Aqui foi melhorada a taxa de aquisição singular dos eixos aumentando a frequência de aquisição, que antes se limitava em 475 Hz, os resultados apresentados na Figura 11.

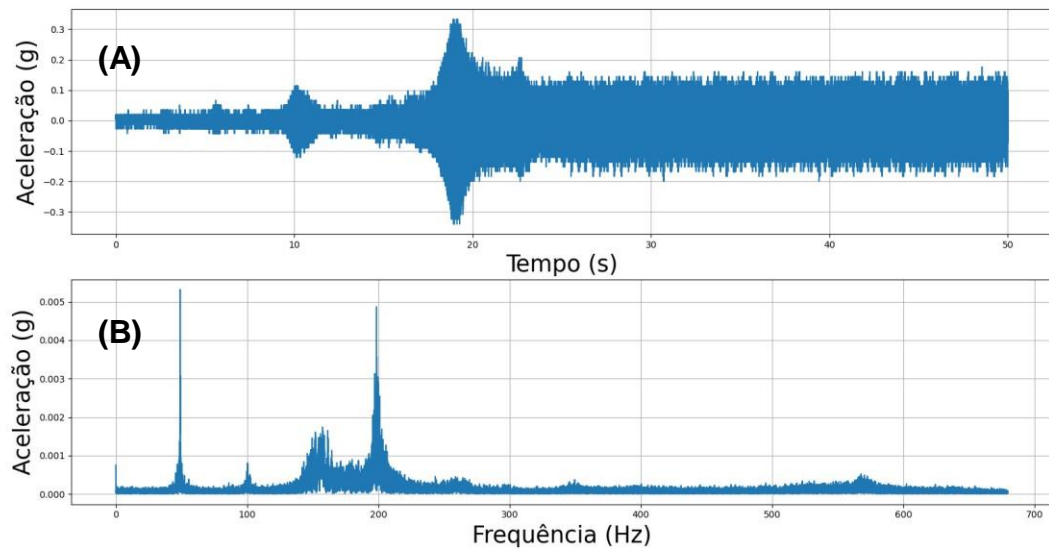


Figura 11 - Coleta com sistema livre em aceleração 50s (0 a 50 Hz), taxa de aquisição alcançada 1359.3 Hz, (A) Sinal no domínio do tempo; (B) Sinal no domínio da frequência.

Na figura 12 é mostrado uma coleta de vibração no mancal mais externo do sistema durante uma rampa de aceleração do motor de 0 a 50Hz em 50 segundos, no gráfico A mostra o sinal no domínio do tempo onde pode ser visto as amplitudes iniciais e quando o sistema se estabiliza em 50 Hz, no domínio da frequência B, com a frequência de coleta maior é obtido um espectro mais rico, mostrando indícios de desalinhamento em 100 e 150 Hz e também os picos de ressonância do sistema em 200 Hz.

Módulo de análise de temperatura

Para o módulo de análise de temperatura, aplicou-se durante o uso do motor onde foi medido a temperatura dos rolamentos do sistema para obter os gráficos de temperatura pelo tempo do ensaio, uma vez que em versões anteriores o módulo só retornava a temperatura e não armazenava os dados para análises futuras. O experimento para aplicação desse módulo foi feito com o motor trabalhando em 20Hz e também em 40Hz.

Os dados coletados com o módulo de temperatura foram comparados com a coleta do sistema de aquisição de dados de bancada QuantumX da HBM juntamente com um termopar. Os experimentos foram feitos na mesma taxa de aquisição de 1 Hz.

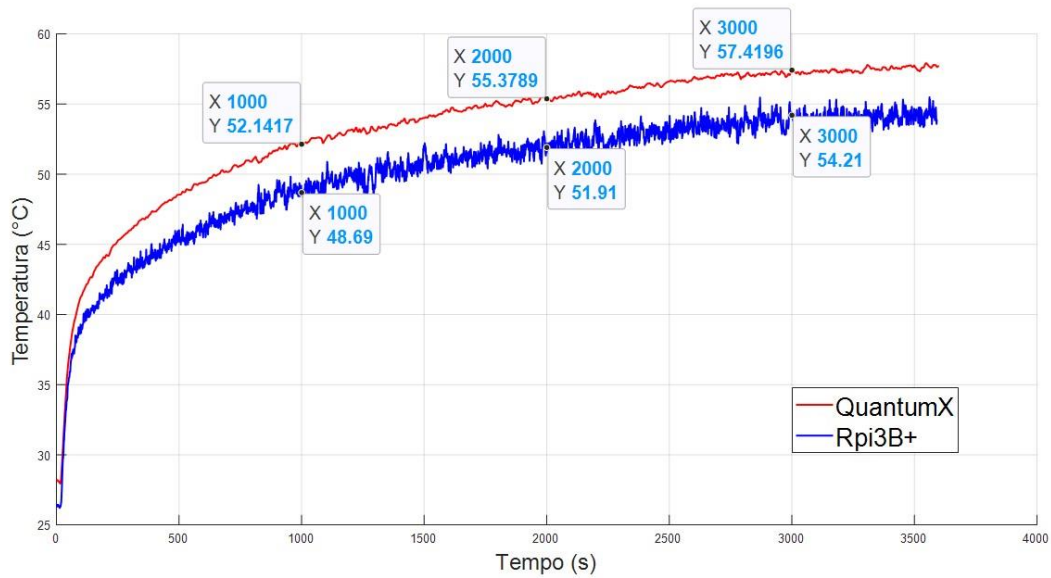


Figura 12 - Variação de temperatura no tempo com o sistema rotativo trabalhando a 20Hz.

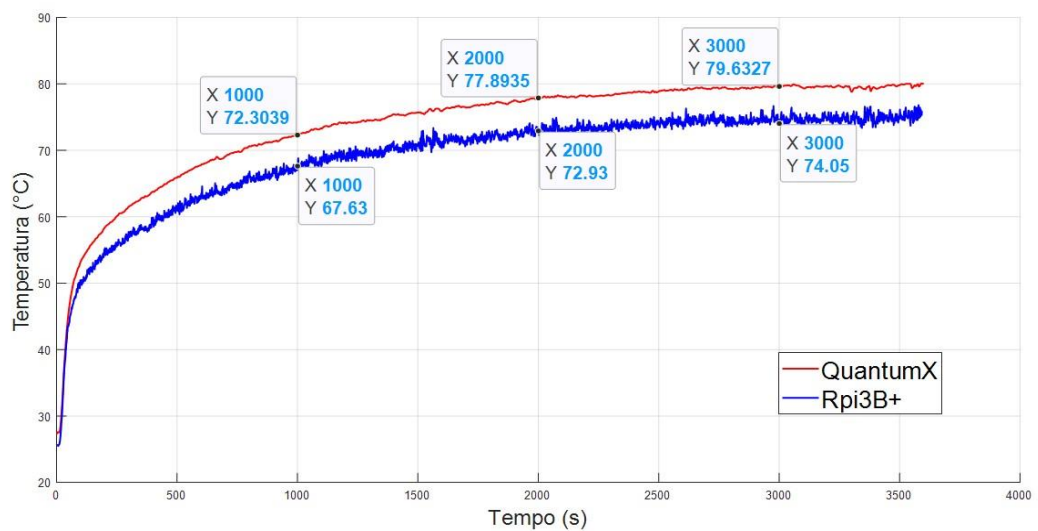


Figura 13 - Variação de temperatura no tempo com o sistema rotativo trabalhando a 40Hz.

Observa-se que no teste a 20 Hz, Figura 12, as temperaturas nos rolamentos variaram de 25 a 55°C no tempo de 3600s, comparando com os dados do QuantumX o módulo desenvolvido no LVI obteve um erro relativo médio de 6.5%.

Já com o sistema rotativo excitado com 40 Hz, Figura 13, as temperaturas coletadas variaram de 25 a 75 °C no tempo 3600s, com 6.8% de erro relativo médio com os dados obtidos a partir do QuantumX.

Módulo de velocidade de rotação

Para o módulo de velocidade o mesmo foi aplicado no sistema rotativo para coletar as revoluções por minuto (RPM) e traçar gráficos das rampas de aceleração do sistema de 0 a 30 Hz e de 0 a 50Hz, tendo em vista que na versão anterior também não salvava esses dados.

Selecionado em trabalhos passados, o sensor IR E18D80NK foi mantido e as alterações nesse módulo foram feitas apenas em software adicionando a função para coletar e plotar gráficos de velocidade por tempo.

Aplicando no sistema rotativo para duas rampas de aceleração diferentes de 0 a 25 Hz, Figura 14 (A) e 0 a 50 Hz, Figura 15 (B), os dados coletados foram comparados com a rampa teórica que o inversor de frequência do sistema retorna.

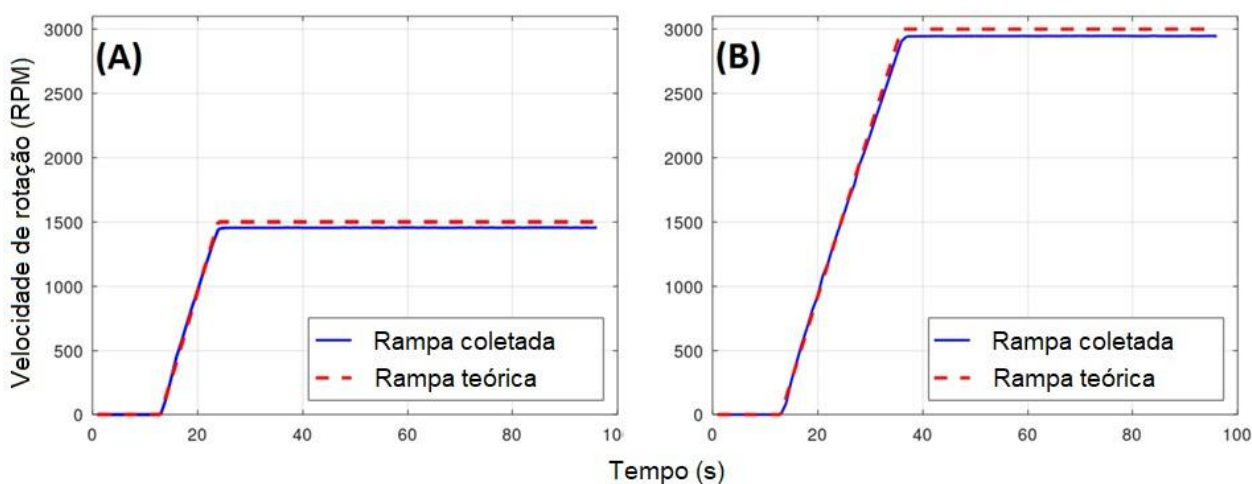


Figura 14 - Rampas de aceleração, (A) 25 Hz; (B) 50 Hz.

As discrepâncias de 0.97% para a rampa do gráfico A e de 0.98% para a rampa B estão associados às perdas de energia nos mancais e no acoplamento flexível utilizado para absorver desalinhamentos entre o eixo do motor e o sistema rotor.

Módulo de balanceamento de sistema rotativo

O módulo de balanceamento integra o módulo de análise de vibrações e o de velocidade de rotação com a atualização de vibração, agora é possível fazer o balanceamento de sistemas rotativos em velocidades de até 30000 RPM o equivalente a 500 Hz.

Devido a falta de um sistema rotativo que trabalhe em altas frequências os experimentos foram feitos com um sistema excitado em 50 Hz, nos espectros de frequência é possível observar outros fenômenos além do desbalanceamento, isso tudo devido ao aumento da frequência de coleta dos dados de vibração.

O experimento foi feito aplicando massas de desbalanceamento de 2 e 4 gramas no sistema e aplicando o módulo para cada uma das situações. Nas Figuras 15 e 16 são apresentadas as comparações antes e depois de aplicar o módulo de balanceamento.

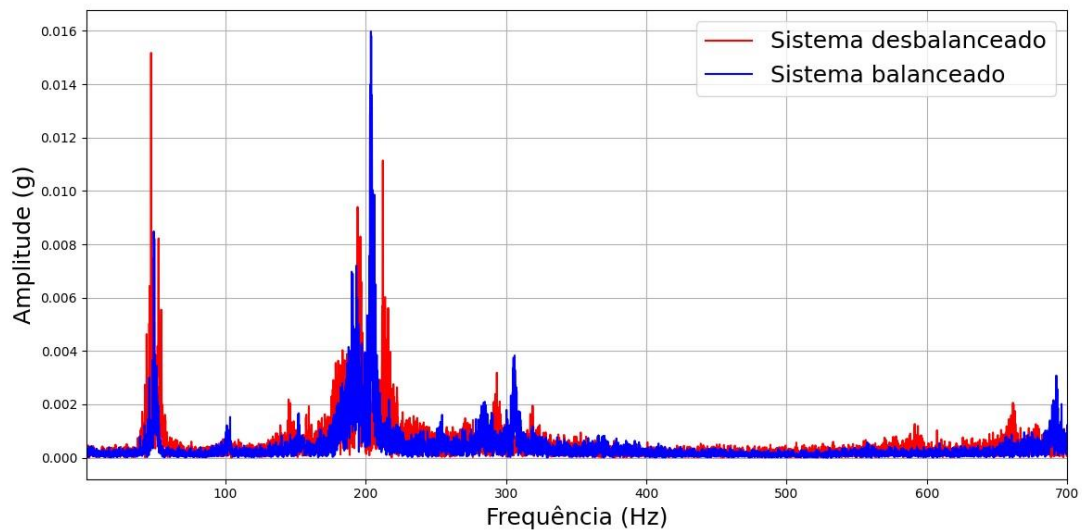


Figura 15 - Sistema desbalanceado com 2 gramas.

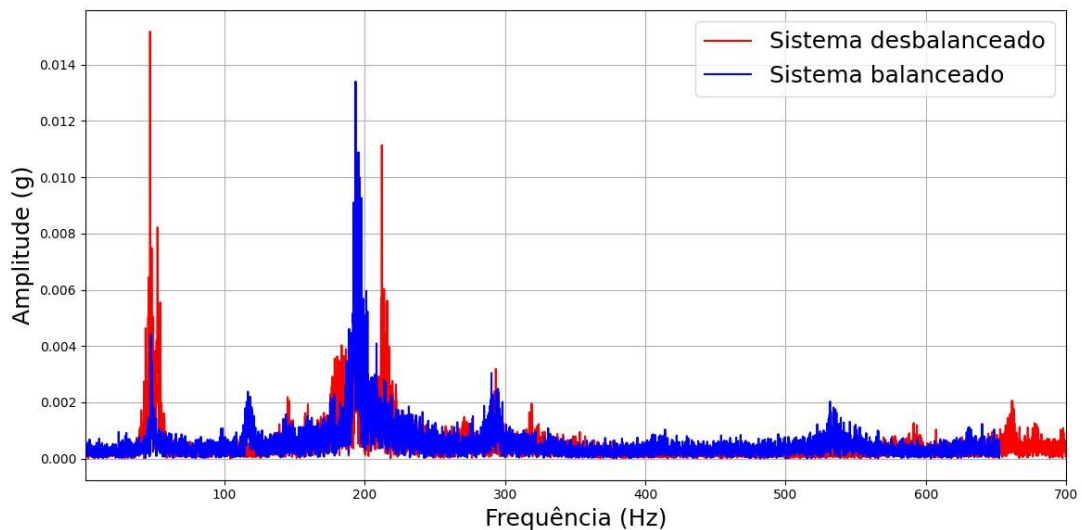


Figura 16 - Sistema desbalanceado com 4 gramas.

As reduções dos picos em 50 Hz, que é a frequência de trabalho em que o sistema rotativo estava durante os experimentos, mostram que ocorreu o balanceamento do sistema. Devido ao aumento da taxa de coleta é possível observar indícios de desalinhamento como foi mostrado anteriormente e também a frequência de ressonância do sistema rotativo é observado onde grandes amplitudes em aproximadamente 200 Hz.

Na Tabela 4 são apresentados os resultados de intensidade, fase e massas de correção encontradas pelo módulo.

Desbalanceamento (gramas)	Massa de teste (gramas)	Massa de correção (gramas)	Fase de correção ($^{\circ}$)	Redução (%)
2	3	4	225	55.7
4	3	6	270	70.0

Nas Figuras 17 e 18 são mostradas as distribuições das massas no disco do sistema rotativo.

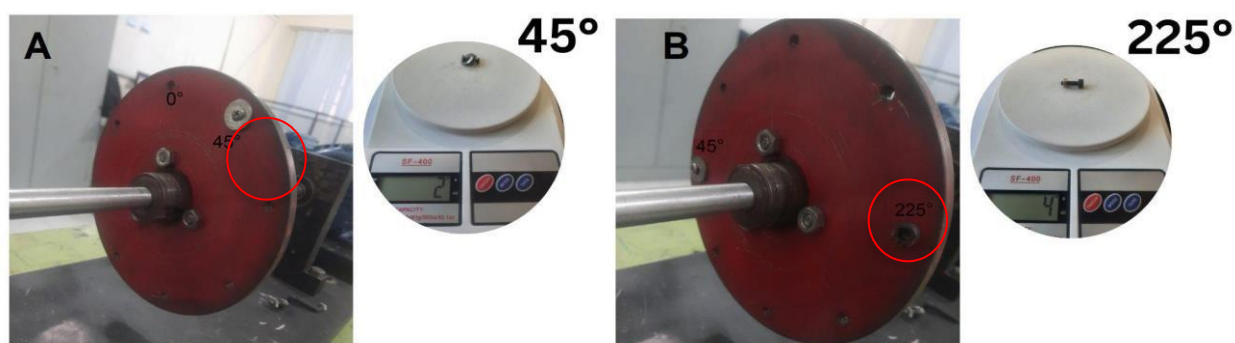


Figura 17 - (A) Adicionando massa 2 gramas para o desbalanceamento, (B) adicionando massa de correção de 4 gramas.

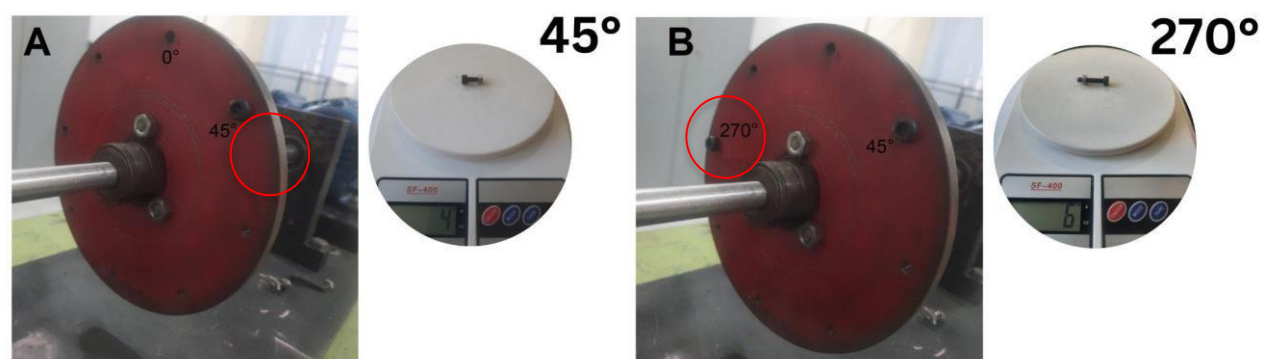


Figura 18 - (A) Adicionando massa de 4 gramas para o desbalanceamento, (B) adicionando massa de correção de 6 gramas.

Conclusões parciais

Com base nos resultados obtidos a partir do aprimoramento do analisador modular de baixo custo em desenvolvimento, pode-se concluir que o uso de tecnologias acessíveis e econômicas constitui uma alternativa viável para a implementação de soluções analíticas em diversas áreas.

O aperfeiçoamento do sistema permitiu a realização de análises de vibração mais abrangentes aqui foi melhorada a taxa de aquisição singular dos eixos aumentando a frequência de aquisição, que antes se limitava em 475 Hz, possibilitando a observação de desalinhamentos em sistemas rotativos e detecção de eventos em frequências mais elevadas com uma taxa de coleta de até 1300 Hz, podendo reconhecer a diferença entre o sistema balanceado e o sistema desbalanceado com 2 e 4 gramas, expondo o aumento das massas desbalanceadas, e também o desalinhamento do sistema.

Além disso, o módulo de temperatura obteve um erro percentual médio de até 6,5% em comparação com um sistema de aquisição comercial, salvando dados de coletas e plotando gráficos.

O módulo de medição de rotação, assim como o módulo de temperatura, também está salvando dados e apresentando aos usuários em forma de gráficos, com erros de apenas 0.97% em comparação com a resposta teórica do sistema rotativo.

O analisador modular de baixo custo pode ser aplicado à função de balanceamento de sistemas rotativos em máquinas mais potentes, com recomendação de uso em até 30000 RPM (500 Hz), possibilitando o processo de balanceamento. Em aplicações em laboratório, o módulo chegou a reduzir em até 70.0% a vibração nos mancais do sistema rotativo.

Esses resultados indicam que o analisador modular de baixo custo pode ser uma ferramenta importante para o avanço da pesquisa científica.

Para os próximos passos ficam a atualização da IHM para uma versão mais amigável, o projeto da estrutura física do módulo e implementar o conceito Plug and Play para a conexão dos sensores.

Quadro 1 – Atividades do projeto.

Etapa	Atividade
1	Revisão bibliográfica a respeito dos módulos já desenvolvidos, dos componentes disponíveis para as aplicações e do conceito <i>Plug and Play (PnP)</i>
2	Seleção de sensores e microcontrolador para atualização (se houver necessidade) e dos métodos de calibração e aperfeiçoamento do analisador
3	Implementação das atualizações das API's e IHM
4	Implementação do conceito para os sensores
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.

Quadro 2 – Cronograma de atividades.

Ano	2022				2023							
Mês	Set	Out	Nov	Dez	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago
1	X	X	X	X	X							
2		X	X	X	X							
3			X									
4												
5			X	X	X	X	X					
6					X	X	X					

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 sensoramento 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.

Silva, Monyque Karoline De Paula; Duarte, Edson Anício; Bortoloti, João Alexandre. **Avaliador De Temperatura Corporal Sem Contato**. Anais Da Exposição Anual De Tecnologia, Educação, Ciências, Cultura E Arte Do Instituto Federal De São Paulo, São Paulo-Sp, 2021.

Hoffmann, Henrique. **Controle De Acesso Automático Por Medição De Temperatura Corporal**. Orientador: Francielli Scarpini Barbosa Cordeiro. 2021. Tcc (Graduação) - Curso De Engenharia Elétrica, Departamento De Engenharia Elétrica, Universidade Do Sul De Santa Catarina, Palhoça-Sc, 2021.

Scheffer, C. Practical Machinery Vibration Analysis And Predictive Maintenance. 1 Ed. Oxford: Elsevier, 2004.