



Aperfeiçoamento do analisador modular de baixo custo em desenvolvimento

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 aperfeiçoando de um analisador modular de baixo custo que, em projetos passados, foi iniciado com 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, 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

Aperfeiçoamento do analisador modular de baixo custo em desenvolvimento

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 proliferation of low-cost microcontrollers and sensors, the aim of this work is to continue improving the low-cost modular analyzer that was initiated in previous projects. This analyzer initially included modules for vibration, temperature, rotational speed, and balancing of rotary systems, employing the Raspberry Pi 3B+ microcomputer.

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

INTRODUÇÃO

A prática de monitoramento de máquinas e estruturas críticas é essencial para aumentar a disponibilidade dos equipamentos, manter um baixo custo de manutenção, 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.

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.

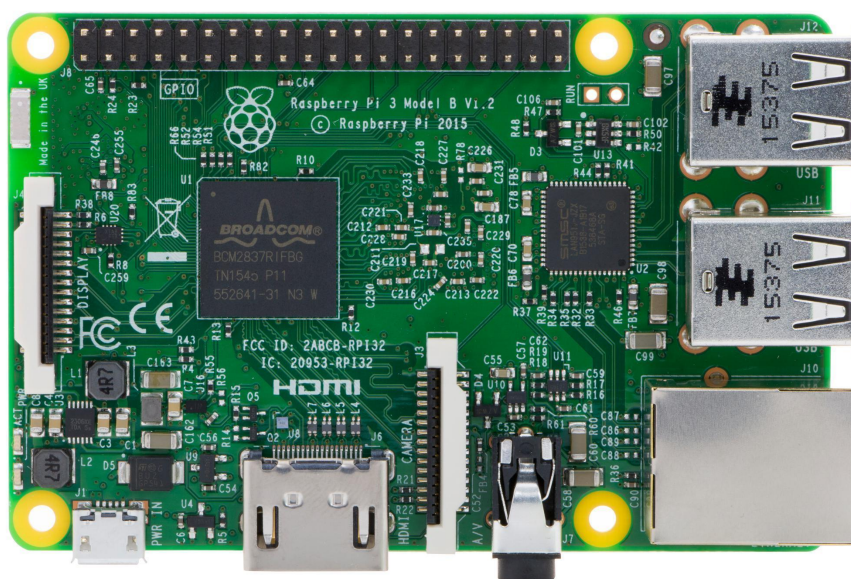


Figura 1 - Raspberry Pi 3B+.

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.

Sensores

Fuentes (2015), descreve o 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 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, demonstrando uma boa precisão, principalmente considerando a diferença de preços.. 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 em um experimento com variação de temperatura.

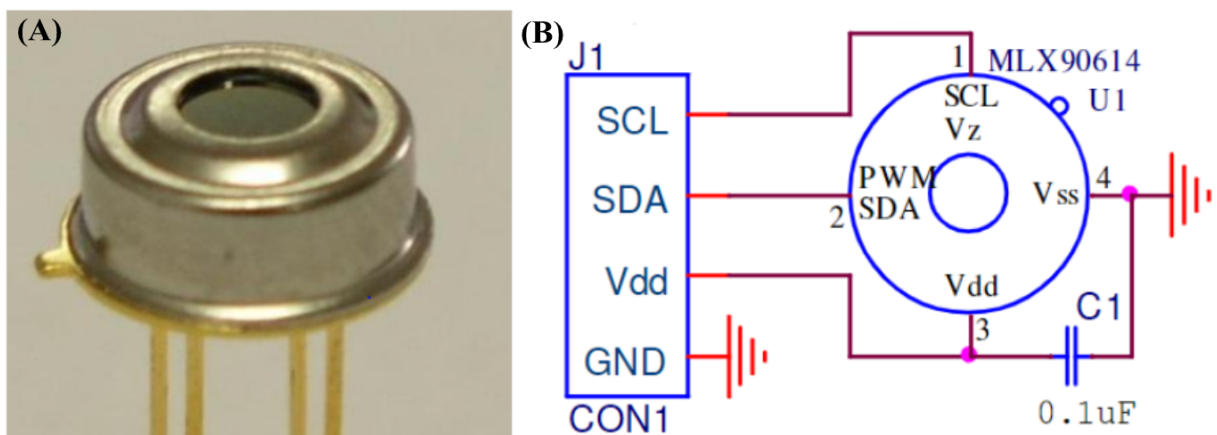


Figura 4 - Sensor de temperatura MLX90614, (A) MLX90614; (B) Conexão para SMBus.

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.

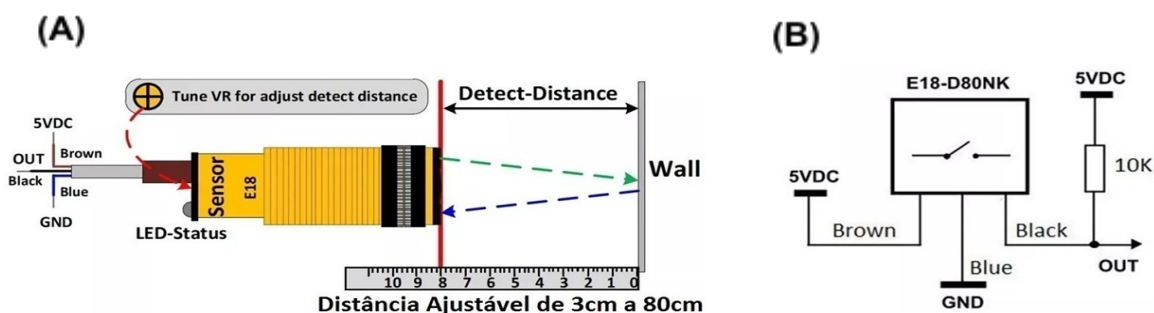


Figura 6 - Sensor infravermelho E18D80NK, (A) Faixa de aplicação; (B) Esquema elétrico.

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+.

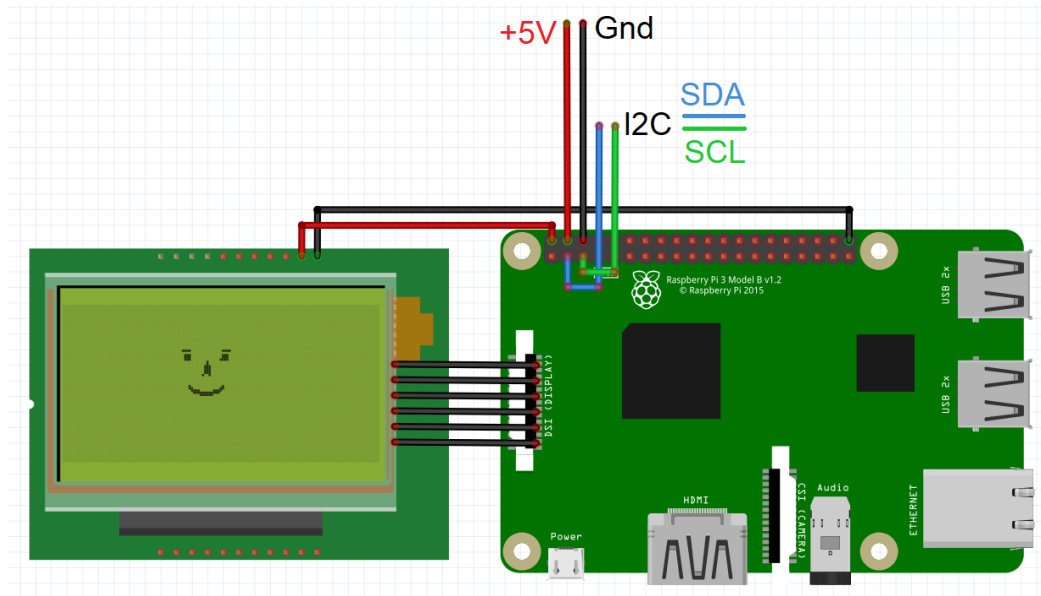


Figura 7 - Conexão I2C da RPi3B+.

Procedimento de validação

Os experimentos foram feitos aplicando o analisador com os módulos desenvolvidos; análise de vibração, temperatura, velocidade de rotação e balanceamento, junto a um sistema rotativo Figura 8.

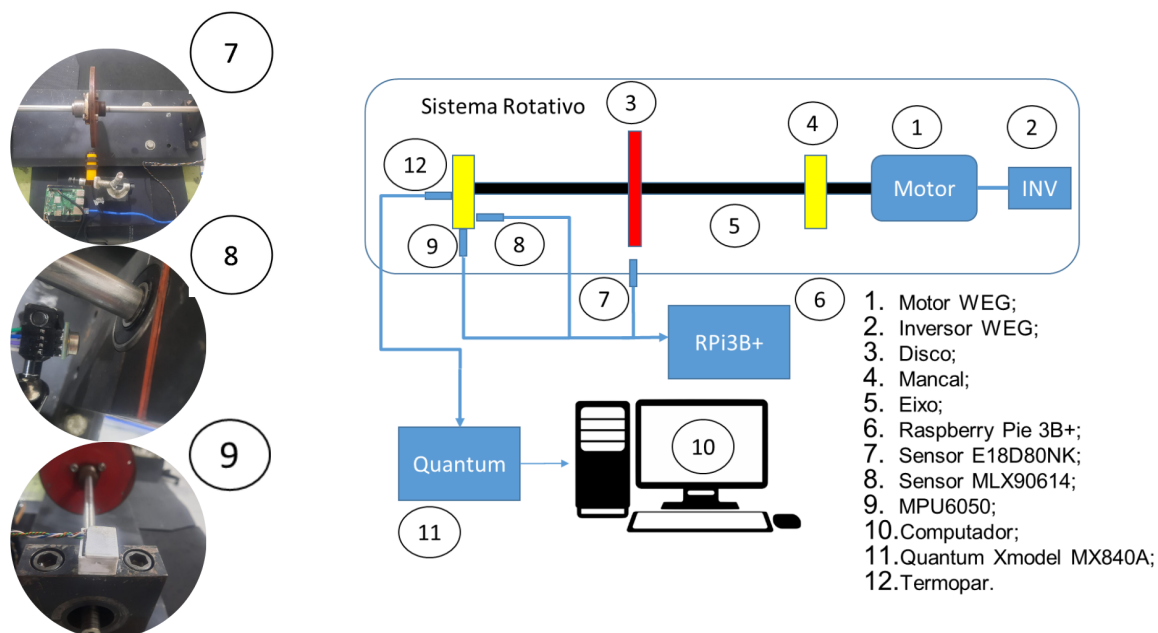


Figura 8 - Sistema rotativo.

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Módulo de análise de vibração

Para o módulo de vibrações o usuário necessita apenas entrar com o tempo desejado para a coleta, como apresentado na Figura 9, após determinar o tempo pode iniciar a coleta e aguardar o tempo previsto. Durante a coleta é possível abortar a operação.

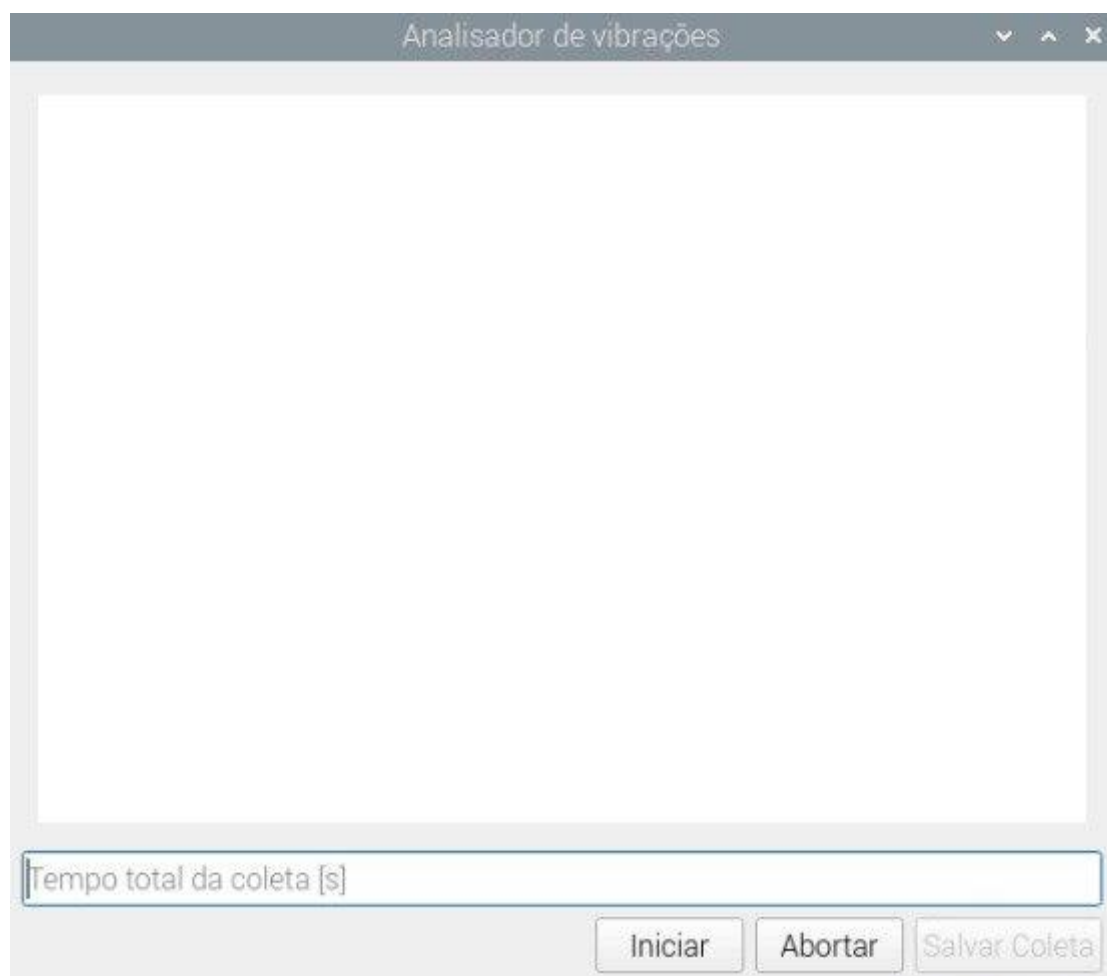


Figura 9 - Tela de início - Módulo de vibração.

Na mesma tela o módulo apresenta os resultados da coleta do sinal captado no domínio do tempo e o espectro do mesmo no domínio da frequência, Figura 10. Nesse momento é aberta a opção para salvar a coleta em arquivo de planilha na extensão **.xlsx**, Figura 11.

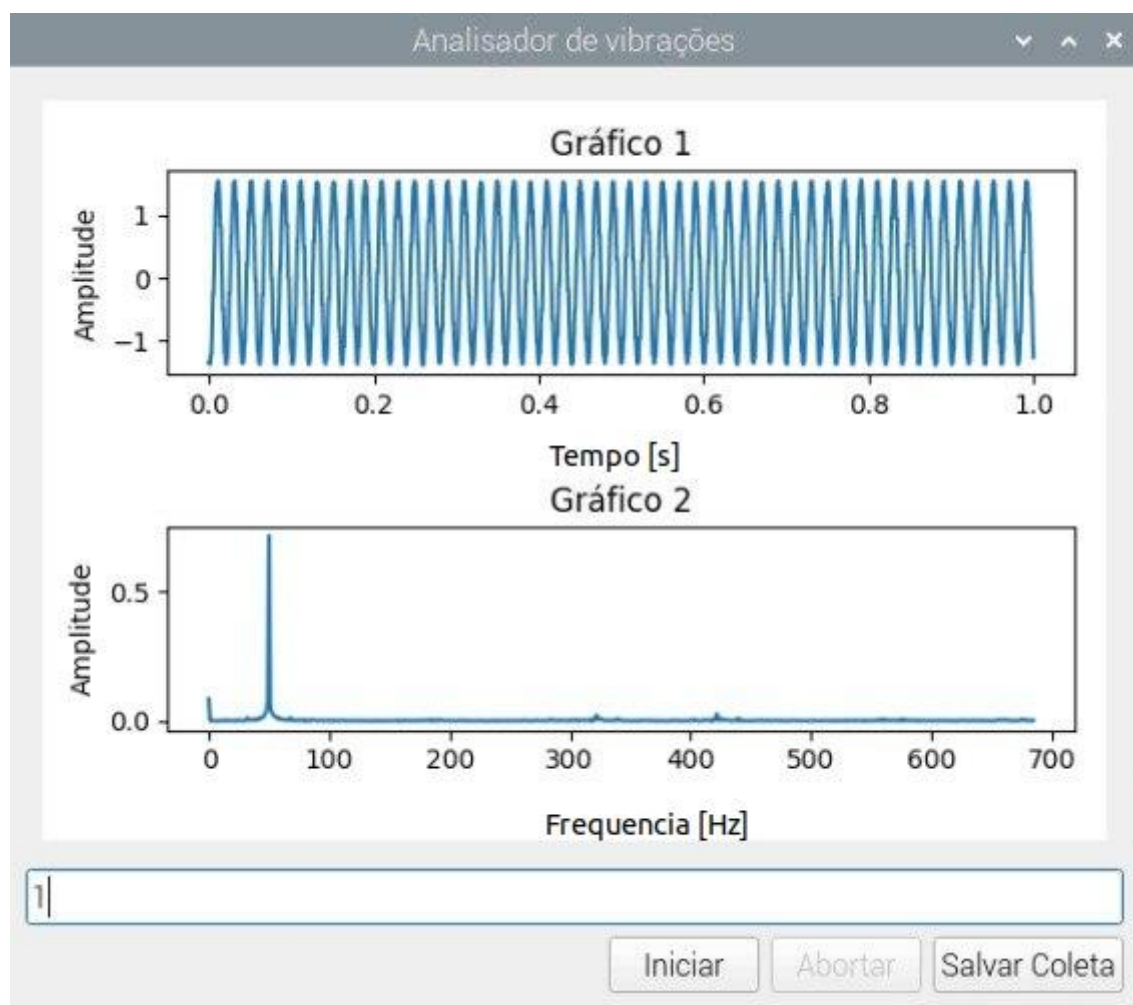


Figura 10 - Tela de resultados - Módulo de vibração.

A Figura 10 exibe um espectro no domínio da frequência com dados até 680 Hz, resultando em uma frequência de amostragem total de 1300 Hz. A atualização do módulo resultou em um aumento de 30% na taxa de amostragem.

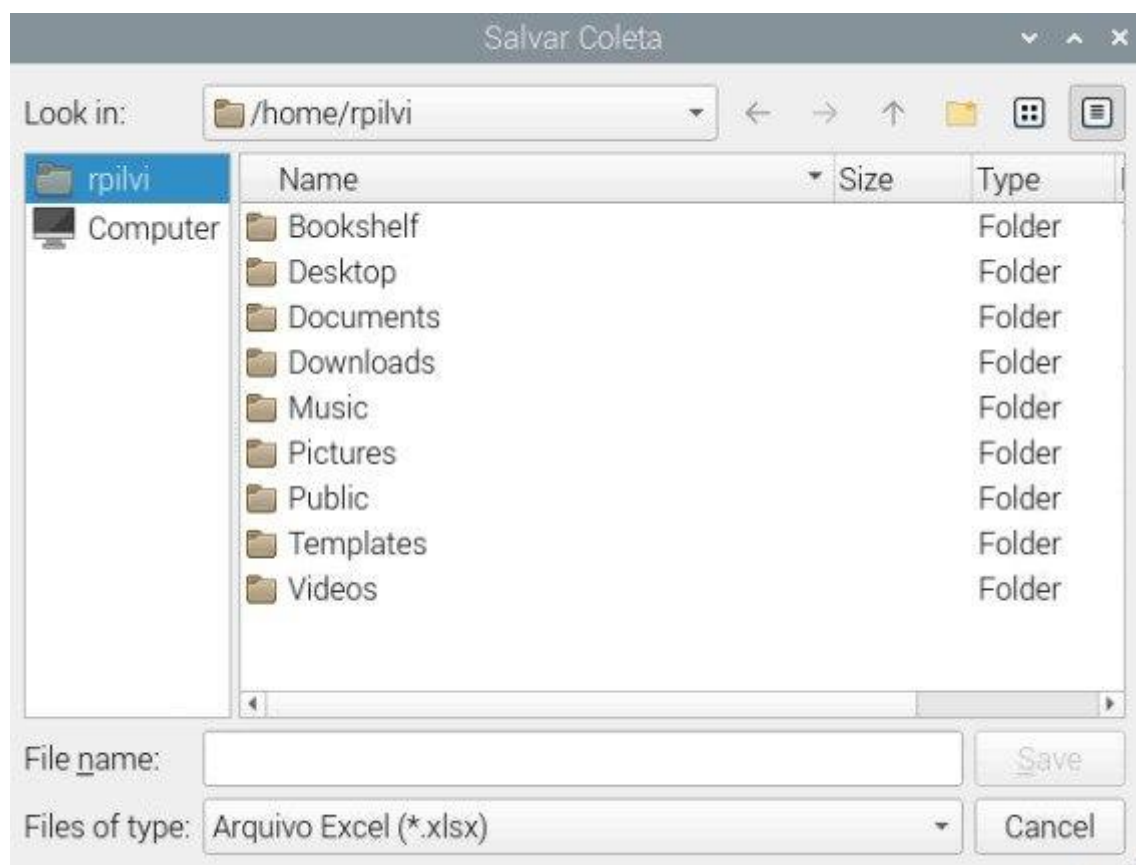


Figura 11 - Tela de save - Módulo de vibração.

Módulo de análise de temperatura

Para o módulo de análise de temperatura a interface foi construída de forma simplista para facilitar esse tipo de análise, Figura 12. Para usar o módulo o usuário deve apenas clicar no botão iniciar, o valor é atualizado a cada segundo para melhorar a visualização da temperatura, Figura 13. O botão de iniciar permanece durante a atualização dos dados.

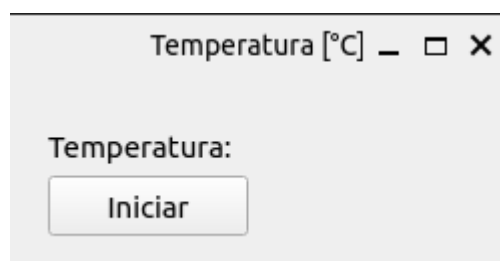


Figura 12 - Tela de início - Módulo de temperatura.



Figura 13 - Tela de resultados - Módulo de temperatura.

Módulo de velocidade de rotação

Similar ao anterior, o módulo para análise de velocidade trabalha com uma interface simples, funcionando como um tacômetro comercial. Para iniciar a coleta o usuário apenas deve clicar no botão iniciar, Figura 13. Os valores de rotação por minuto são atualizados a cada segundo, Figura 14.



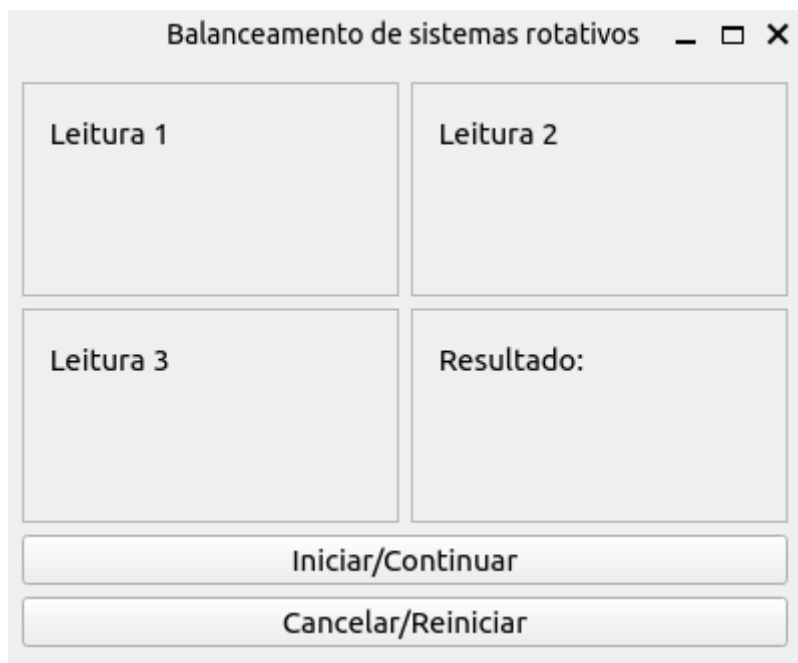
Figura 14 - Tela de início - Módulo de velocidade de rotação.



Figura 15 - Tela de resultados - Módulo de velocidade de rotação.

Módulo de balanceamento de sistema rotativo

Para o sistema de balanceamento é necessário três coletas para completar o ciclo do método usado no desenvolvimento desse módulo. A Figura 16 apresenta a tela inicial do módulo.



Balanceamento de sistemas rotativos	
Leitura 1	Leitura 2
Leitura 3	Resultado:
Iniciar/Continuar	
Cancelar/Reiniciar	

Figura 16 - Tela de início- Módulo de balanceamento de sistemas rotativos.

Passo 1: Para dar início o usuário deve clicar no botão “Iniciar/Continuar”, depois da coleta o módulo apresenta os dados coletados.

Passo 2: Agora deve ser adicionado a massa de teste no sistema, para esse módulo é usado uma massa de teste de 3 gramas, a massa de teste é posicionada numa posição avulsa no sistema rotativo, essa posição agora vai ser a posição 0° (zero graus) do sistema rotativo, clicando no botão “Iniciar/Continuar” o módulo faz a segunda leitura e apresenta o resultado.

Passo 3: Nesse momento a massa de teste deve ser posicionada agora a 180° (cento e oitenta graus) da posição anterior, a **Figura 17** mostra um modelo de referência para orientação, e mais uma vez é feita a coleta clicando no botão “Iniciar/Continuar”, Figura 18..

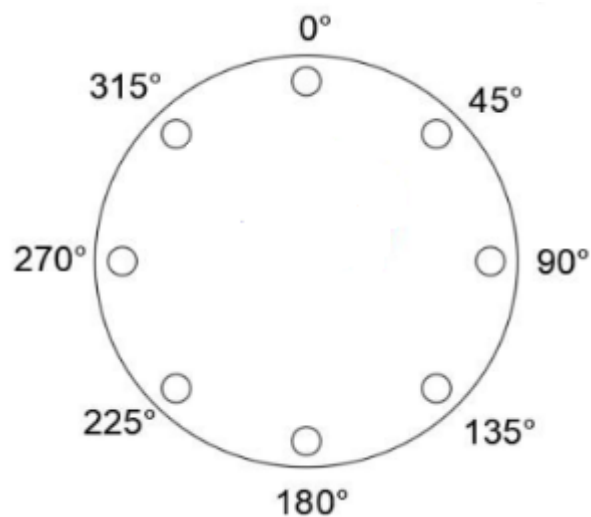


Figura 17 - Disco de referência.

Interface de software para balanceamento de sistemas rotativos. O título da janela é "Balanceamento de sistemas rotativos". A interface contém:

Leitura 1	Leitura 2
Módulo: 13888	Módulo: 11225
Fase[°]: 43	Fase[°]: 255

Leitura 3	Resultado:
Módulo: 16645	
Fase[°]: 33	

Botões de ação:

- Iniciar/Continuar
- Cancelar/Reiniciar

Figura 18 - Tela de coleta - Módulo de balanceamento de sistemas rotativos.

Feita as três leituras, basta clicar em “Iniciar/Continuar” e o módulo mostra a massa de correção e a posição que ela deve ser posicionada para que seja efetivado o balanceamento do sistema rotativo, Figura 18.

Balanceamento de sistemas rotativos	
Leitura 1 Módulo: 13888 Fase[°]: 43	Leitura 2 Módulo: 11225 Fase[°]: 255
Leitura 3 Módulo: 16645 Fase[°]: 33	Resultado: Massa[gramas]: 270 Posição[°]: 45.3
Iniciar/Continuar	
Cancelar/Reiniciar	

Figura 19 - Tela de resultados - Módulo de balanceamento de sistemas rotativos.

Caso ocorra algum erro durante o processo a coleta pode ser reiniciada clicando no botão “Cancelar/Reiniciar”, essa operação pode ser feita durante o tempo de coleta.

CONCLUSÃO

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 que a realização das análises para a manutenção preditiva seja feita por qualquer usuário de forma simples e eficaz.

Apois as atualizações a análise de vibração ficou mais abrangente 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, dessa forma 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.

O módulo de medição de rotação, assim como o módulo de temperatura, também está apresentando dados tais como outros sistemas comerciais, mas como uma interface mais amigável desenvolvida usando o poder do microcomputador usado.

Esses resultados indicam que o analisador modular de baixo custo é uma ferramenta importante e viável para o uso na manutenção preditiva.

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.

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.