



Aplicação de microcontroladores de baixo custo no desenvolvimento de um analisador modular - Módulo de medição de rotações e balanceamento

José Sávyo Soares Lira ¹, Richard Senko ²

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 o custo de fabricação, porém, a falta de manutenção adequada aumenta a 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 levem ao descarte do equipamento. A manutenção preditiva é aplicada para antecipar e identificar esses tipos de problemas antes que causem problemas que levem a inatividade temporária não planejada ou 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. O investimento nesses analisadores pode ser comum para as grandes indústrias e se torna um investimento arriscado para as indústrias de médio e pequeno porte principalmente em tempos incertos. Aproveitando a atual expansão de microcontroladores e sensores de baixo custo, o objetivo deste trabalho é dar continuidade no desenvolvimento de um analisador modular de baixo custo que em projetos passados foi iniciado com os módulos de vibrações, temperatura e de trincas e descontinuidade, aplicando o microcontrolador Raspberry Pie 3B+, atualmente no presente projeto foi desenvolvido o módulo de medição de rotação e balanceamento.

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

¹Aluno do <Nome do Curso>, Departamento de <Nome do Departamento>, UFPA, Campina Grande, PB, e-mail: emaildoaluno@seuprovedor.com

²<Titulação>, <Função>, <Departamento>, UFPA, Campina Grande, PB, e-mail: emaildoorientador@seuprovedor.com

Application of low-cost microcontrollers in the development of a modular analyzer - Rotation and balancing measurement module

ABSTRACT

The monitoring and evaluation of machines in continuous operation are of vital importance in the industrial sector, especially considering the high competition and the search for high-quality products without increasing the cost of manufacturing, however, the lack of adequate maintenance increases the possibility of equipment suffering from failures or unexpected downtime, causing an increase in cost. Predictive maintenance is used to anticipate and encounter these types of problems before they cause problems that lead to the disposal of the equipment. Predictive maintenance is applied to anticipate and identify these types of problems before they cause problems that lead to unplanned time inactivity or disposal of equipment. However, to apply this type of maintenance, some analyzers are used to keep up-to-date the state of the machinery by doing nondestructive analyses or collecting information such as vibrations, temperatures, and rotational speeds. Investments in these analyzers can be common for large industries and become a risky investment for medium and small industries, especially in uncertain times. Taking advantage of the current expansion of microcontrollers and low-cost sensors, the objective of this work is to continue the development of a low-cost modular analyzer that in past projects was started with the modules of vibrations, temperature and cracks, and discontinuity, applying the Raspberry Pie 3B+ microcontroller, currently in this project was developed the module of rotation measurement and balancing.

Keywords: Microcontrollers, modularity, predictive maintenance, cost, rotating systems, balancing.

INTRODUÇÃO

O monitoramento e avaliação de equipamentos em operação contínua é de suma importância no setor industrial, o qual tem como redução de custos como um dos seus principais pilares para o desenvolvimento. Para indústrias de grande porte ou bem estabelecidas financeiramente, investimentos nos setores de manutenção para compra de equipamentos adequados para monitoramentos são práticas comuns. Todavia, pequenas e médias indústrias vêem esta necessidade de investimentos como um risco, devido aos altos custos destas novas tecnologias. Logo com o rápido desenvolvimento e a expansão de diversas aplicações em setores residenciais, industriais, automotivos e telecomunicações (Denardin, 2008, p.1), os microcontroladores de código aberto são tidos como uma opção de baixo custo.

Em paralelo, os sensores de baixo custo compatíveis com estas placas de prototipagem rápida também estão sendo desenvolvidos e aplicados em diversas áreas para medições de vibrações, temperaturas, rotações entre outras.

Um exemplo pode ser visto em Pacheco, Roquitski e Frankiv (2013), que aplicaram um microcontrolador PIC-16F877A, para a implementação de um sistema de aquisição de dados de velocidade e temperatura para a análise de moto-ventiladores de refrigeradores. Numa faixa de operação de 1800-3100 RPM (Revoluções por minuto), o sistema apresentou um desvio percentual abaixo de 1%.

Silva, Lima e Salazar (2017), aplicaram junto de um sensor de efeito Hall um Arduino para o desenvolvimento de um tacômetro magnético para medição de velocidade em PIG's instrumentados. Registrando leituras com um tacômetro analógico usado para comparação chegaram à erros percentuais de 0,16%. Uma aplicação similar foi feita por Lima et al. (2021), aplicando um tacômetro magnético com Arduino para o monitoramento de sistemas rotativos, na comparação com um tacômetro óptico, obtiveram erro de 0,61%, nas leituras.

No trabalho de Pooja, D et al (2018), foi aplicado o sensor IR LM-393 junto com um Arduíno para o desenvolvimento de um tacômetro de baixo

custo. Segundo o autor, o sistema apresentou uma resposta rápida, dinâmica e de alta precisão, além de trabalhar numa ampla faixa de velocidade, com erros de 0,46% quando registradas as leituras em comparação à um tacômetro analógico.

Mascoloti (2021), desenvolveu um módulo para monitoramento de saúde estrutural de máquinas rotativas com a raspberry pi e o acelerômetro MPU6050 e Sales (2020) que aplicou um ESP32, junto com um sensor de efeito hall e um disco piezoelétrico no desenvolvimento de um dispositivo embarcado para o balanceamento dinâmico de peças rotativas onde o sistema obteve uma melhoria de até 88,5%.

Mesmo com diversas aplicações de microcontroladores e sensores de baixo custo sendo desenvolvidos a cada dia e sabendo que o projeto destes seguem princípios da modularidade, ainda não são encontrados sistemas robustos e que seguem tais princípios. Tendo normalmente aplicações focadas numa aplicação específica.

Através da modularidade pode-se aplicar o paralelismo no desenvolvimento dos projetos permitindo que o tempo de alteração do módulo não afete significativamente no tempo de desenvolvimento do produto. Outro aspecto da modularidade é a possibilidade de redução no custo do ciclo de vida através da redução de processos. (VIERO E NUNES, 2016, P.7)

Em projetos anteriores, seguindo os princípios da modularidade, desenvolveu-se módulos de análise de vibrações, temperatura e ultrassom para detecção de trincas e descontinuidades em materiais aplicando microcontroladores e sensores de baixo custo com o intuito de facilitar operações de manutenção. Este trabalho tem como propósito continuar o desenvolvimento deste analisador modular com a aplicação de um sistema medidor de velocidade (tacômetro); que tem o objetivo informar a velocidade do equipamento e obter diagnósticos de defeitos (Pooja et al 2018), e balanceamento; que buscam reduzir a perturbação gerada na movimentação de rotores pela não coincidência do eixo principal de inércia com o eixo de rotação de um rotor (Hillman, 2013; Magalhães, 2013, Campos, 2017), de sistemas rotativos.

MATERIAIS E MÉTODOS

MICROPROCESSADOR - RASPBERRY PI 3 B+

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 pie 3B+.

Tabela 1 - Especificações da Raspberry pie 3 B+.

| | |
|----------------|---|
| Processador | Broadcom BCM2837B0 Cortex-A53 64 bits Quad-core |
| Clock | 1.4 Ghz |
| Memória | 1 GB LPDDR2 |
| Portas USB 2.0 | 4 |

| | |
|-----------------------|--|
| Conectividade | Gigabit Ethernet over USB 2.0, Wifi dual band e Bluetooth 4.2/BLE |
| GPIO | 40 pinos |
| Slot Cartão | Micro USB |
| Quantidades de GPIO's | 25 |
| Alimentação | 5V via USB ou GPIO |

TOUCHSCREEN DISPLAY 7"

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 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. Para esta pesquisa, os sensores deverão desempenhar a funcionalidade de tacômetros.

Segundo Mello e Silva (2010), os tacômetros são equipamentos de medição usados para captar valores relacionados a eventos de tempo, utilizados na medição de velocidade, vazão ou rotações em intervalos de tempo, na indústria estão presentes dois tipos de tacômetros mecânicos e

digitais. Neste trabalho serão avaliados os infravermelhos (IR) e os de efeito Hall.

SENSORES INFRAVERMELHOS (IR)

Os sensores infravermelhos (IR – Infrared) foram selecionados devido a capacidade de detecção e comparação de movimento e obstáculos, disponibilidade e custo.

O princípio de trabalho é com o sinal do tipo NPN (negativo-positivo-negativo) o qual produz uma saída digital do tipo alta, ou igual a 1, quando detectam algo dentro da sua região de detecção que pode ser alterada manualmente por um dispositivo de resistência (potenciômetro) e fornecem dados sem contato.

SENSOR INFRAVERMELHO - E18D80NK

O sensor IR E18-D80NK, Figura 3, 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.

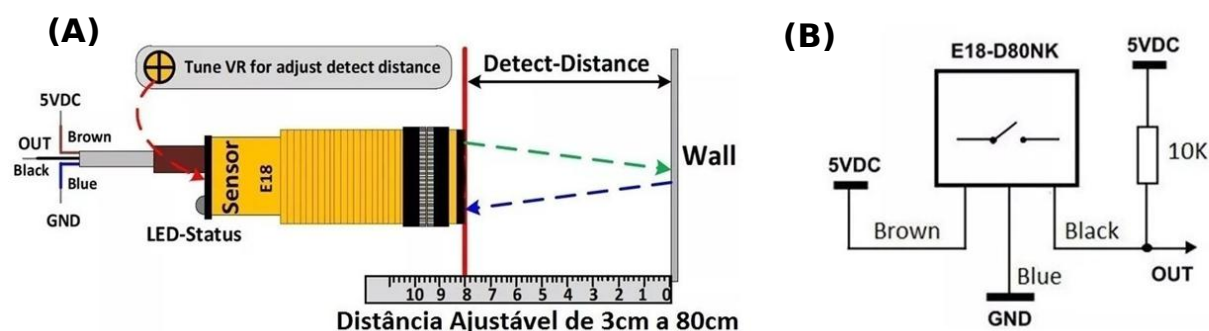


Figura 3 - Sensor infravermelho E18-D80NK, (A) Range de aplicação; (B) Esquema elétrico.

Tabela 2 - Especificações dos Sensores utilizados.

| Sensores | Tensão de entrada | Consumo de corrente | Dimensões | Tipo de detecção | Alcance | Saída | Valores (R\$) |
|----------|-------------------|---------------------|-----------|------------------|----------|-------|---------------|
| LM-393 | 3,3 - 5V | 25-100mA | 1,7x4,5cm | Reflexivo difuso | 3 à 80cm | NPN* | 10,70 |
| E18- | 3,3 - 5V | 10-20mA | 37x14mm | Reflexivo | 3 à | NPN* | 34,0 |

| | | | | | | | |
|-------|----------|---------|---|-----------------|------|------|------|
| 80NK | | | m | difuso | 50cm | | 0 |
| KY003 | 3,3 - 5V | 10-20mA | - | Campo magnético | 5mm | NPN* | 2,78 |

**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.*

SENSOR INFRAVERMELHO - LM393

O sensor LM-393, Figura 4, particularmente é bastante usado na construção de robôs seguidores de linha, voltados para a implementação com microcontroladores como o Arduino, (Pooja et al, 2018; MasterWalter, 2019). Na Tabela 2 são apresentadas as suas principais características.

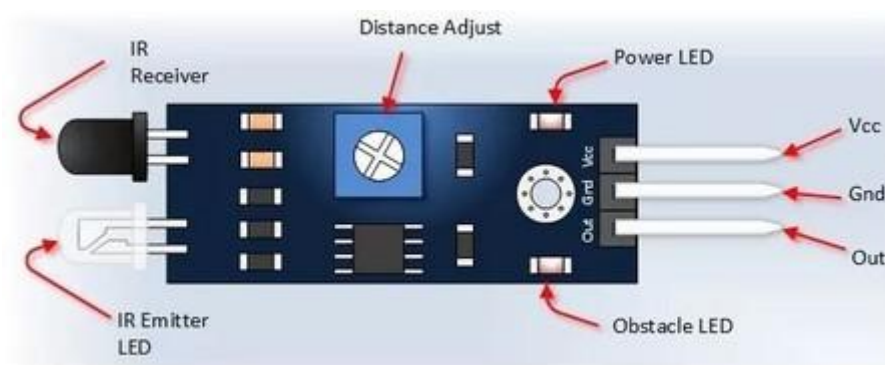


Figura 4 - Sensor infravermelho LM-393

SENSORES MAGNÉTICOS DE EFEITO HALL

Esses tipos de sensores utilizam de um fenômeno físico chamado efeito Hall para gerar os pulsos de sinais digitais que pode ser recebido por qualquer microcontrolador.

Este efeito descreve o fenômeno físico pelo qual se gera uma tensão elétrica numa placa metálica percorrida por uma corrente, situada num campo magnético perpendicular a ela e que é perpendicular ao campo magnético e à direção da corrente. (Porto Editora – efeito de Hall na Infopédia [em linha]. Porto: Porto Editora. [consult. 2021-12-19 21:04:09]. Disponível em: [https://www.infopedia.pt/\\$efeito-de-hall](https://www.infopedia.pt/$efeito-de-hall)).

Os sensores que trabalham com o efeito Hall detectam e medem campos magnéticos ao seu redor e são usados na indústria e na eletrônica

para monitorar equipamentos sem contato físico, tendo assim uma vida útil elevada. Uma das aplicações é como sensor de rotação, como apresentado por Silva, Lima e Salazar (2017), que desenvolveram um tacômetro em cima desse princípio, onde adotaram o uso de ímãs de neodímio para que o forte campo magnético gerado por eles seja o suficiente para serem captados pelo sensor, mesmo num curto período de tempo ocasionado pela rotação de próprio motor, Figura 5.

A partir dessas informações o sensor de efeito Hall KY003 foi selecionado para os estudos deste trabalho, as características dele são apresentadas na Tabela 2.

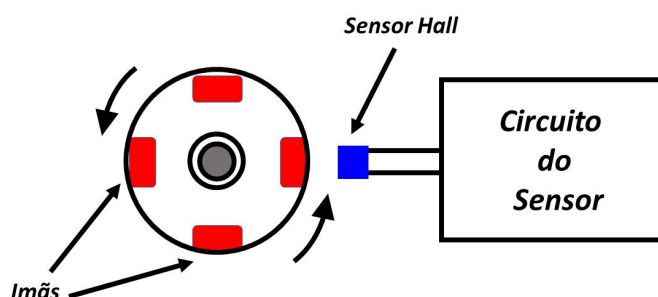


Figura 5 - Demonstração para sensores de efeito Hall

ACELERÔMETRO MPU6050

O MPU6050, Figura 6, 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.



Figura 6 - Acelerômetro MPU-6050

Utilizado por Mascoloti (2021) no desenvolvimento de sensoriamento de baixo custo para monitoramento da saúde estrutural de uma máquina rotativa que obteve uma correlação de 70% entre o MPU6050 e um acelerômetro Tractian, este sensor foi o escolhido para a aplicação.

PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

O experimento a seguir foi realizado para a validação dos sensores apresentados anteriormente, tendo o objetivo a seleção do qual irá se adequar melhor de acordo com a aplicação.

MONTAGEM

Inicialmente foi feita a montagem de acordo com o diagrama da figura 7.

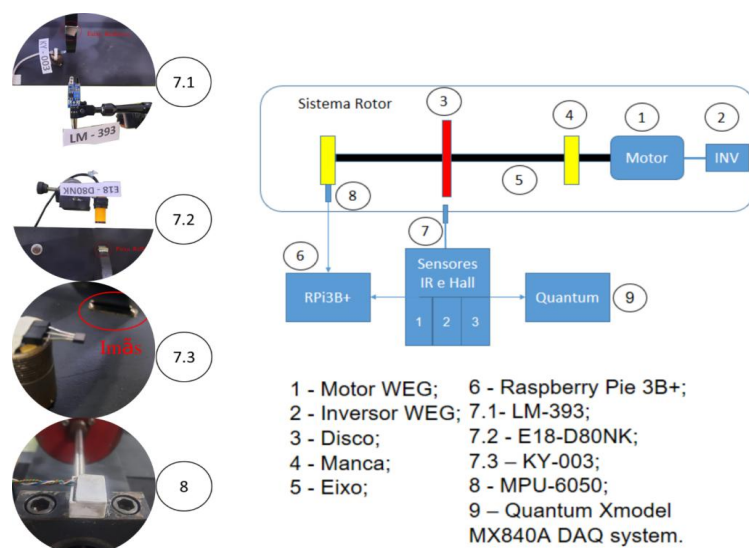


Figura 7 - Montagem do experimento.

No disco (3) foram adicionadas fitas reflexivas para acionar os sensores infravermelhos e ímãs para acionar o sensor de efeito Hall, os sensores foram posicionados estrategicamente para evitar erros de leituras. Para conectar os sensores (6) no MX480B (8) foi usada uma fonte de alimentação DC, o pino de saída de cada sensor é ligado num cabo VGA e conectado no sistema de aquisição (8) como apresentado no esquema abaixo.

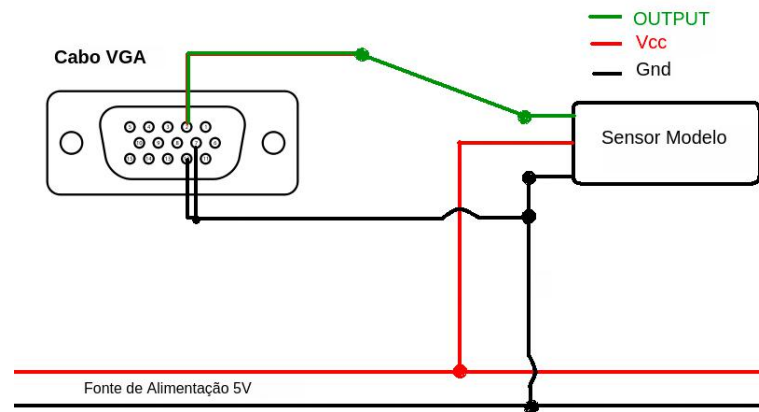


Figura 8 - Esquema para conexão dos sensores de baixo custo no HBM

Esse esquema serve para os três tipos de sensores usados devido a conexão dos pinos e tensão de alimentação serem iguais. O sistema foi excitado com frequências de 20, 30 e 40 Hz através do inversor de frequência (2), para cada valor foram realizados testes aumentando o número de pulsos para realizar o acionamento dos sensores. Foi utilizado 1 e 2 pulsos por revolução, o aumento desses pulsos é aplicado para aumentar a frequência de saída melhorando a precisão e para determinar qual a melhor forma de aplicação desse sistema.

Para a segunda parte do experimento o sistema foi desbalanceado com 1, 2 e 4 gramas, o mesmo trabalhando em 50 Hz e com o sensor MPU (8) foi coletado as reações nos mancais (4).

DESENVOLVIMENTO E APLICAÇÃO DO MÓDULO DE MEDIÇÃO DE VELOCIDADE DE ROTAÇÃO

No desenvolvimento da API (Interface de programação de aplicação) foram pesquisadas diversas bibliotecas e técnicas de simulação de interrupção, sendo o principal elemento o tempo de execução do código, usando Python, linguagem de programação presente na Raspberry pi.

O código recebe os pulsos da GPIO (General Purpose Input/Output) e começa a medir o período entre os pulsos, que com esses dados realiza a seguinte operação.

$$RPM = \left(\frac{1}{\text{período}} \right) * 60 \quad (1)$$

O valor calculado é atualizado e mostrado na tela à cada 10 pulsos para melhorar a apresentação dos valores.

DESENVOLVIMENTO E APLICAÇÃO DO MÓDULO DE BALANCEAMENTO DE SISTEMAS ROTATIVOS

Para o processo de balanceamento de sistemas rotativos existem diversos métodos, dentre eles o dos coeficientes de influência, o qual foi escolhido para ser implementado no módulo a ser desenvolvido, colocado a prova por Magalhães (2013), onde obteve 84% de redução do desbalanceamento.

Para aplicação do método dos coeficientes de influência é necessário medir a vibração de forma vetorial com amplitude e fase. Para isso foi usado o MPU6050 para medir a intensidade da vibração causada pelo desbalanceamento do sistema rotativo e para a medição da fase utilizou-se o sensor tacômetro selecionado para a implementação do módulo de medição de velocidade, onde é calculado a defasagem entre o zero do sinal de vibração e a borda de subida do sinal quadrado do sensor de velocidade.

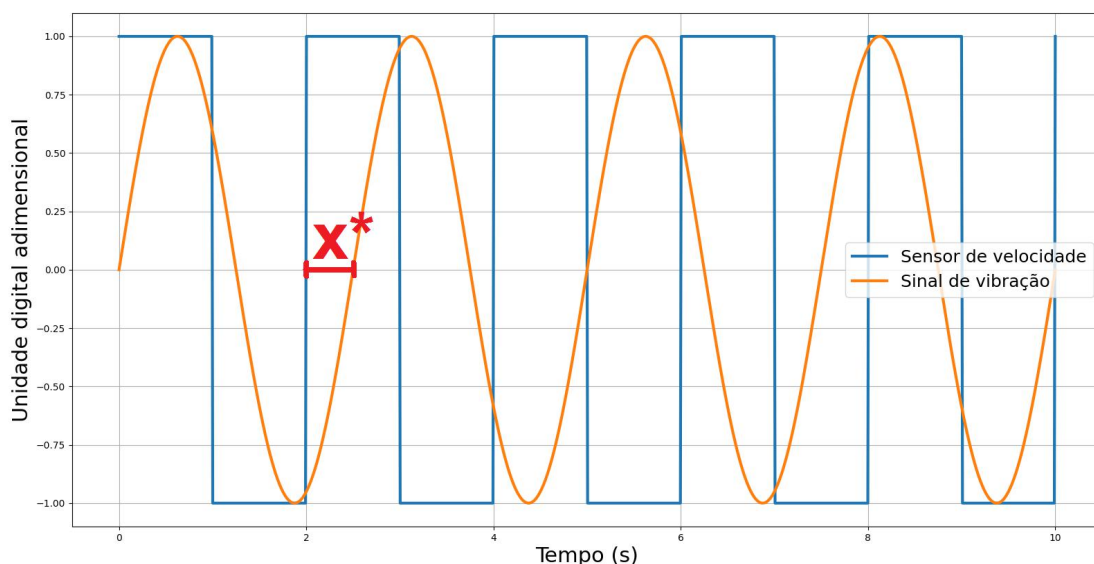


Figura 9. Sinais de velocidade e vibração onde X é a defasagem entre os sinais.

Tendo a defasagem do tempo $x = x1 - x0$, é aplicada a seguinte regra:

$$\theta = \frac{x \cdot 360^\circ}{x_0} \quad (2)$$

Sendo θ o ângulo de fase do sinal de vibração.

Aplicando o método dos coeficientes de influência, inicialmente mede-se a vibração original do sistema V_0 coletando-se intensidade e fase, Figura 10A.

Depois é adicionada uma massa de teste no sistema rotativo, a posição em que a massa de teste é posicionada, será considerada a posição 0° , e mede-se mais uma vez a vibração do sistema rotativo, V_1 , com intensidade e ângulo de fase, Figura 10B.

Com esses dados é feita a operação vetorial $V_{ef} = V_1 - V_0$, sendo V_0 a vibração original do sistema, V_1 a vibração obtida após a inserção da massa de teste e V_{ef} o efeito da massa de teste sobre sistema rotativo, Figura 10C.

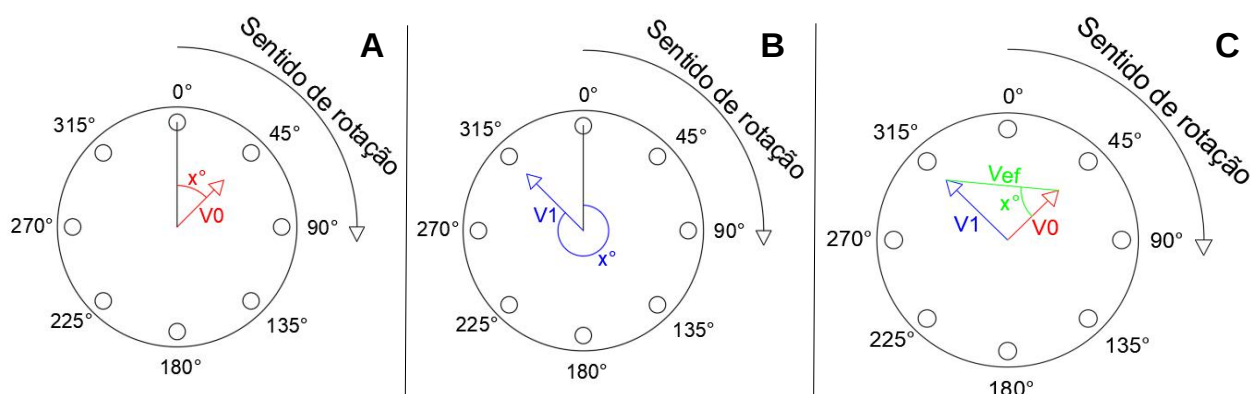


Figura 10 – Passos da aplicação do método dos coeficientes de influência.

Para calcular a massa de correção MC é utilizada a seguinte relação:

$$MC = \frac{V_0 \cdot MT}{V_{ef}} \quad (3)$$

Onde MT é a massa de teste em gramas que foi utilizada durante o processo.

Para calcular o ângulo de fase, é tomada a relação entre os vetores V_{ef} e V_0 (Figura 10C), o ângulo formado entre esses dois vetores é a posição a partir da posição zero no sentido de rotação do rotor.

Retira-se a massa teste, adiciona-se a massa de correção na posição obtida e repete a leitura para verificar se houve redução das reações das vibrações causadas pelo desbalanceamento do sistema rotativo, caso necessário o processo é repetido (refinamento) até atingir um nível ideal de acordo com a aplicação e a norma vigente.

RESULTADOS E DISCUSSÕES

DETERMINAÇÃO DA FREQUÊNCIA E VELOCIDADE DE ROTAÇÃO

Para qualificar os sensores escolhidos através dos estudos bibliográficos foi utilizado a montagem descrita na Figura 6, onde os dados advindos de cada sensor foram coletados simultaneamente para comparação. Esse ensaio foi executado para identificar quais sensores conseguiriam trabalhar na faixa de frequência selecionada (20 a 60 Hz) e dentre eles comparar os melhores resultados e o que melhor se adaptaria com o Raspberry pi. Na Tabela 3 são apresentados os resultados obtidos.

Tabela 3 - Resultados experimentais com os sensores aplicados em comparação com o Quantum MX840A.

| Frequências coletadas com 1 pulso por revolução (Hz/Erro%) | | | |
|--|------------|------------|------------|
| Quantum | E18-D80NK | LM-393 | KY-003 |
| 20,00 | 19,90/0,50 | 19,90/0,50 | 20,00/0,00 |
| 39,80 | 39,66/0,35 | 39,66/0,35 | 39,80/0,00 |
| 59,80 | 59,80/0,00 | 59,80/0,00 | 60,99/1,95 |
| Frequências coletadas com 2 pulsos por revolução (Hz/Erro%) | | | |
| Quantum | E18-D80NK | LM-393 | KY-003 |
| 20,00 | 19,90/0,50 | 19,90/0,50 | 19,90/0,50 |
| 39,80 | 39,66/0,35 | 39,66/0,35 | 39,80/0,00 |
| 59,80 | 59,75/0,08 | 59,75/0,08 | 59,75/0,08 |

As leituras no sistema de aquisição da HBM, com 1 pulso por revolução, onde os três sensores se mostraram efetivos, atingindo erros de até 2% em comparação com a placa de aquisição Quantum. Já para o

sistema com 2 pulsos o erro foi reduzido para até 0,5%. Sendo que as maiores variações ocorreram para o sensor de efeito hall KY-003.

Submetendo tacômetro comercial minipa modelo MDT-2238 ao mesmo experimento e comparando as velocidades coletadas com as velocidades obtidas através da raspberry pi com os sensores de baixo custo, os resultados estão demonstrados na tabela 4.

Tabela 4 - Resultados dos experimentos com o tacômetro comercial.

| Velocidades coletadas com 1 pulso por revolução (Rpm/Erro%) | | | |
|--|-----------|-----------|-----------|
| MDT-2238A | E18-D80NK | LM-393 | KY-003 |
| 1200 | 1194/0,50 | 1194/0,50 | 1194/0,50 |
| 2388 | 2380/0,34 | 2380/0,34 | 2380/0,34 |
| 3588 | 3588/0,00 | 3588/0,00 | 3659/1,94 |

Na comparação com o tacômetro comercial MDT-2238A os erros também chegaram próximos a 2%, isso principalmente com o sensor de efeito hall, o qual obteve as maiores taxas de variação de erros em ambas as comparações.

BALANCEAMENTO DE SISTEMAS ROTATIVOS

Para validar o sistema desenvolvido, foram feitos experimentos com o sistema desbalanceado com parafusos de 1, 2 e 4 gramas, uma massa de teste de 3 gramas foi usada durante o processo de coleta dos dados. Após o processo de balanceamento o resultado é comparado com os valores coletados antes da aplicação do processo. Nas figuras 13, 14 e 15 são apresentadas as comparações das reações coletadas em um mancal do sistema rotativo antes e depois de aplicar o módulo de balanceamento, desenvolvido para o analisador modular. Os dados para comparação foram coletados com o sistema de aquisição Quantum Xmodel da HBM com um acelerômetro PCB 353B31 usando a constante de conversão 5,1(mV)/1(m/s²) presente no manual do acelerômetro.

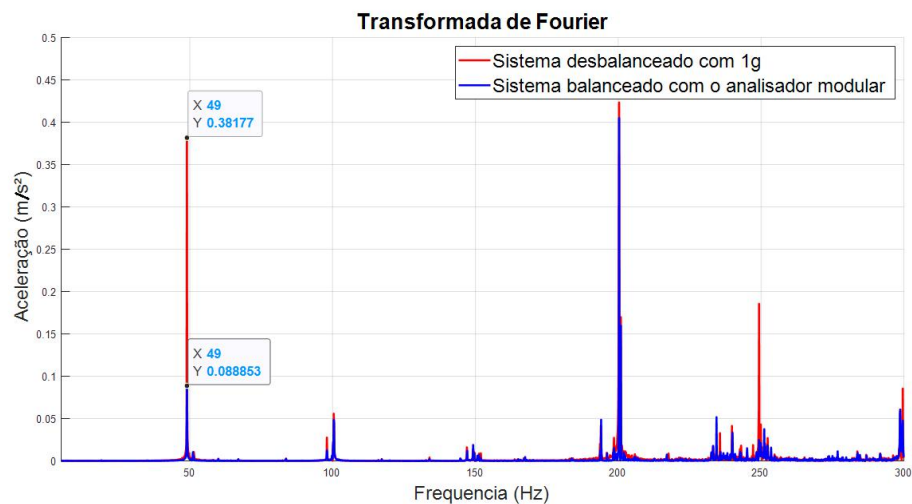


Figura 11 – Sistema desbalanceado com 1 grama.

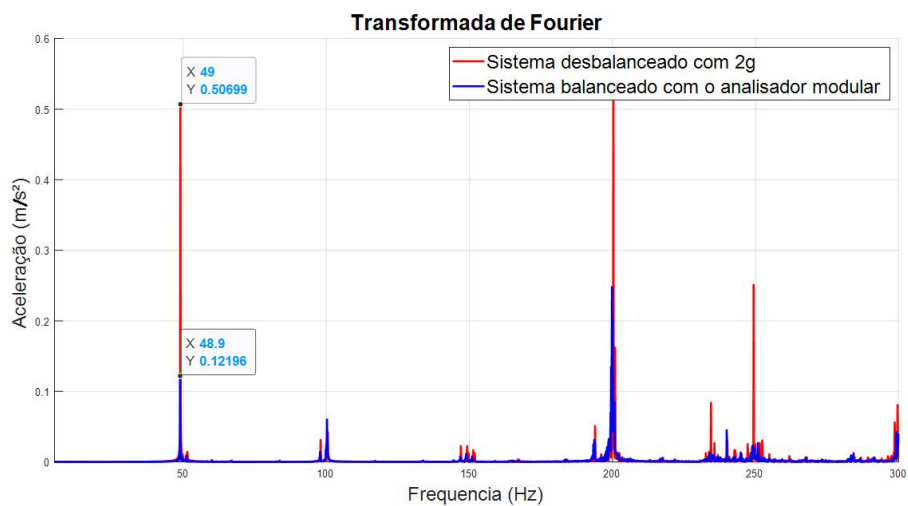


Figura 12 – Sistema desbalanceado com 2 gramas.

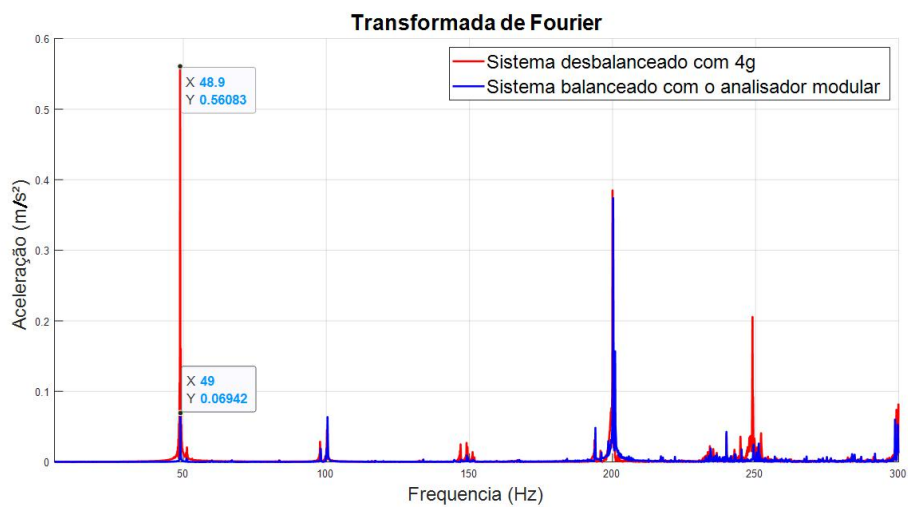


Figura 13 – Sistema desbalanceado com 4 gramas.

Picos encontrados em 2 e 3 vezes a frequência de rotação indicam um possível desalinhamento entre o eixo no motor e o eixo do sistema rotativo Scheffer (2004). Na tabela 5 são apresentados os resultados de intensidade fase e as massas de correções encontradas pelo módulo.

Tabela 5 - Resultados da aplicação do módulo de balanceamento.

| Desbalanceamento (gramas) | Massa de teste (gramas) | Massa de correção (gramas) | Fase de correção | Reduça ão (%) |
|------------------------------|----------------------------|-------------------------------|---------------------|------------------|
| 1 | 3 | 3 | 20° | 76.7 |
| 2 | 3 | 5.5 | 55° | 76.0 |
| 4 | 3 | 6 | 46° | 88.5 |

CONCLUSÃO

Usando o equipamento industrial de bancada, o Quantum MX480A (referência), o módulo de medição de velocidade desenvolvido apresentou resultados com erros percentuais abaixo de 0,5% para os sensores IRs e de até 2% para o sensor de efeito hall. Um modelo de tacômetro óptico convencional, Minipa MDT-2238A, foi colocado a prova e para uma medida de frequência obtiveram-se percentuais de erros semelhantes da comparação anterior.

Sendo assim, qualquer um dos sensores testados em conjunto com o módulo de medição de velocidade desenvolvido (tacômetro), poderiam ser usados para obter velocidade de sistemas rotativos. Levando em consideração a fácil aplicação e segurança, os sensores infravermelhos se mostram mais eficientes pelo fato de que, ao adicionar as massas dos ímãs no rotor isso pode gerar um desbalanceamento. Além de que para obter boas leituras o sensor de efeito Hall deve estar bem próximo do rotor. Entre os sensores IR, por ser mais robusto, o sensor E18D80NK foi escolhido para aplicação nos módulos de análise de velocidade de rotação e balanceamento.

Unindo o módulo de velocidade de rotação com MPU6050 e aplicando ambos com o método dos coeficientes a determinar para o balanceamento de sistemas rotativos, esse módulo conseguiu reduzir em

até 88% as reações no mancal analisado, se mostrando bem eficiente para aplicação.

REFERÊNCIAS

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

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

PACHECO, G.; ROQUITSKI, G.; FRANKIV, I. A. **Sistema microcontrolado de aquisição de dados para análise de motoventiladores aplicados a refrigeradores**. Orientador: Prof. Me. Amauri Amorin Assef. 2013. TCC (Graduação) - UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ, CURITIBA, 2013.

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.

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

SILVA, Antônio Eduardo de Moraes; LIMA, Gustavo Fernandes de; SALAZAR, Andrés Ortiz. **Desenvolvimento de tacômetro magnético para medição de velocidade em pigs instrumentados**. Holos, Rio Grande do Norte, 2 mar. 2017.

LIMA, G. F. de *et al.* APLICAÇÃO DE UM TACOMÊTRO MAGNÉTICO NO MONITORAMENTO DE ROTAÇÃO UTILIZANDO ARDUINO DE VELOCIDADE EM PIGs INSTRUMENTADOS. **Holos**, Rio Grande do Norte, 27 jul. 2021.

Cariappa P K, Pooja D, Shwetha A, Sudharani B T, Geetha M N, 2018, **Contact-Less Tachometer**, INTERNATIONAL JOURNAL OF ENGINEERING RESEARCH & TECHNOLOGY (IJERT) NCESC – 2018 (Volume 6 – Issue 13).

DENARDIN, Prof. Gustavo Weber. **Microcontroladores. Microcontroladores**, 2008.

VIERO, Carlos Frederico; NUNES, Carlos Frederico. **Module, modularity, modularization modular product: a theoretical analysis about the conceptual historical evolution**. ESPACIOS, Universidade Feevale, ano 2016, 1 fev. 2016.

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.

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

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.

MASTERWALTER ELETRONIC SHOP. **Como usar com arduino - sensor seguidor de linha tcrt5000**, 2019. Página inicial. Disponível em: < <https://blogmasterwalkershop.com.br/arduino/como-usar-com-arduino-sensor-seguidor-de-linha-tcrt5000>>. Acesso em: 29 de março de 2022.

SALGADO, F. D. C. **UM SISTEMA EMBARCADO PARA REGISTRO DE FLUXO DE PESSOAS: Uma aplicação à biblioteca do Campus II da**

UNIFESSPA. Orientador: Dr. Elton Rafael Alves. 2019. TCC (Graduação) - UNIVERSIDADE FEDERAL DO SUL E SUDESTE DO PARA, Marabá-PA, 2019.

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.

MAGALHÃES, D. L. **Balanceamento de Rotores Utilizando os Métodos dos 3 Pontos e do Coeficiente de Influência.** 2013. Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2013.

CAMPOS, R. N. **Análise experimental de balanceamento de rotores pelo método de otimização “four run method accelerated”.** 2017. UnB, 2017.

HILLMAN, B. **Balancing Rigid Rotors in the Field.**

MAGALHÃES, Diego Landim. **Balanceamento de Rotores Utilizando os Métodos dos 3 Pontos e do Coeficiente de Influência.** Orientador: Luis Antônio Vaz Pinto, D.Sc. 2013. TCC (Graduação) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2013.

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.

SALES, Helder Escobar. **Desenvolvimento de um dispositivo eletrônico embarcado para o tratamento de informações utilizadas no processo de balanceamento dinâmico de peças rotativas.** Orientador: Ph.D. André Augusto Mariano. 2020. TCC (Graduação) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2020.

Scheffer, C. **Análise prática de vibração de máquinas e manutenção preditiva.** 1 Ed. Oxford: Elsevier, 2004.