

Sistema de baixo custo para monitoramento de vibração

Gustavo Rogel de Almeida¹

RESUMO

O presente trabalho, traz a proposta do desenvolvimento de protótipo utilizando arduino *Due*, acelerômetro de tecnologia *MEMS* e periféricos que possibilitem a medição de vibrações e tenham resultados que sejam comparados a medidores já consolidados no mercado. O arduino *Due* é uma versão recente do micro controlador arduino, tem grande poder de processamento e permite a comunicação entre o acelerômetro e o computador, já que inclui os protocolos de comunicações *SPI* e *USB*. O acelerômetro digital *MEMS* é um elemento fundamental do protótipo, considerando suas características de montagem, consumo de energia e robustez de operação. A avaliação do protótipo será realizada em laboratório, utilizando um motor equipado com uma estrutura metálica possibilitando a simulação de vibração.

Palavras-chaves

Arduino Due. MEMS. Medidor de vibrações. Engenharia Mecânica.

ABSTRACT

The present work brings a prototype proposal using arduino *Due*, MEMS technology accelerometer and peripherals that allow a measurement of vibrations and results that are compared to meters already consolidated in the market. The arduino is a recent version of the arduino micro controller, has great processing power and allows communication between the accelerometer and computer, as it includes SPI and USB communication protocols. The MEMS digital accelerometer is a fundamental element of the prototype, having its mounting characteristics, energy consumption and robustness of operation. The evaluation of the prototype was performed in the laboratory, using a metallic structure allowing a simulation of vibration.

Keywords

Arduino Due. MEMS. Vibration meter. Mechanical Engineerin

¹Engenheiro Eletricista pelo Centro Universitário de Volta Redonda – UniFOA.
gustavo-rogel@hotmail.com

1 INTRODUÇÃO

As vibrações estão envolvidas em várias atividades humanas, como na respiração que está associada a vibração dos pulmões (GONZÁLES, 2014), e são definidas segundo Wang (2008) como uma oscilação mecânica em torno de um ponto de referência. Apesar de serem inerentes à vida, as vibrações são indesejadas em alguns processos, trazendo prejuízos, como por exemplo, levando máquinas em processo à deterioração (GONZÁLES, 2014).

A análise de vibrações, é um método de manutenção preditiva que tem como objetivo reduzir o tempo de paradas de equipamentos e melhorar sua vida útil. Mas devido ao alto valor para aquisição de analisadores de vibração, o uso em manutenção se torna restritivo, e muitas vezes colocado em segunda plano (JÚNIOR et al., 2016). Com o avanço tecnológico, tornou-se possível o desenvolvimento de equipamentos de baixo custo focado em manutenção preditiva utilizando plataformas eletrônicas de código aberto, como os arduinos, e tecnologia *MEMS* (*Micro Electro Mechanicals Systems* – Sistemas microeletromecânicos), o que permite o desenvolvimento de uma infinidade de equipamentos (DESHMUKH, 2005).

O arduino, basicamente, é um equipamento micro controlado capaz de ler uma entrada digital ou analógica e transformá-la, de acordo com a programação, em uma saída (SCHULTZ & VAN VUGT, 2016). Possuem diversas características como, baixo custo, *software* de programação utilizado em diversos sistemas operacionais e ambiente de programação simples e claro (ARDUINO, 2018). Já os equipamentos de tecnologia *MEMS*, são sistemas de dimensões micrométricas que operam sob os domínios das energias elétrica e mecânica (BHUGRA & PIAZZA, 2017). São também classificados como micro transdutores e tem seu conceito básico de funcionamento baseado na integração de micro sensores, micro atuadores e microeletrônica (TRESSENO, 2014) e (CHAUDHURY, SENGUPTA, & MUKHERJEE, 2014). Dentro da família dos *MEMS*, há diversos equipamentos para as mais diversas utilidades, como por exemplo giroscópios, medidores de corrente elétrica, sensores, acelerômetros, entre outros (LIAO & ZHAO, 2005).

Aliando o uso do arduino com o acelerômetro *MEMS*, é possível o desenvolvimento de um sistema de baixo custo capaz de captar e monitorar vibrações. Para análise dos dados obtidos, se faz necessário utilizar um *software* potente e versátil como o *MatLab* (*MATrix LABORatory*) para a aplicação de técnicas de processamento de sinais, tornando os resultados mais precisos e claros.

Com vista aos problemas causados por vibrações, este trabalho tem como objetivo o desenvolvimento de um protótipo, baseado em equipamentos de baixo custo, capaz de monitorar e analisar vibrações.

2 ANÁLISE DE VIBRAÇÕES

Todas as máquinas em operação geram vibrações que se transmitem a todo o conjunto da máquina, produzindo um espectro de frequência próprio do conjunto, denominado “assinatura espectral”. Com essa assinatura é possível obter informações sobre as condições de funcionamento da máquina (MARAN, 2011).

Os métodos de análise de vibração estão altamente desenvolvidos. Com o uso de instrumentos de medição, é possível que sejam reconhecidos diversos tipos de falha, como: desbalanceamento, desalinhamento, empenamento de eixos, excentricidade, desgastes em engrenagens e mancais, má fixação da máquina ou de componentes internos, roçamento, erosão, ressonância, folgas, desgastes em rolamentos e outros componentes rotativos, fenômenos aerodinâmicos e/ou hidráulicos e problemas elétricos (SHIN & HAMMOND, 2008).

Um importante fator em diagnose de falhas são suas características e a análise daquelas que coincidem com as frequências que tiveram aumento nos componentes do espectro. Eisenmann & Eisenmann (1997) e Sodano, Inman & Park (2004) fazem uma análise detalhada sobre as formas mais comuns de vibrações em máquinas e equipamentos. Enquanto que o primeiro afirma que o desbalanceamento é o tipo mais habitual, o segundo menciona que esta forma de vibração normalmente o espectro se dá na rotação de $1xRPM$ (Hz).

2.1 Técnicas de Processamento de Sinais

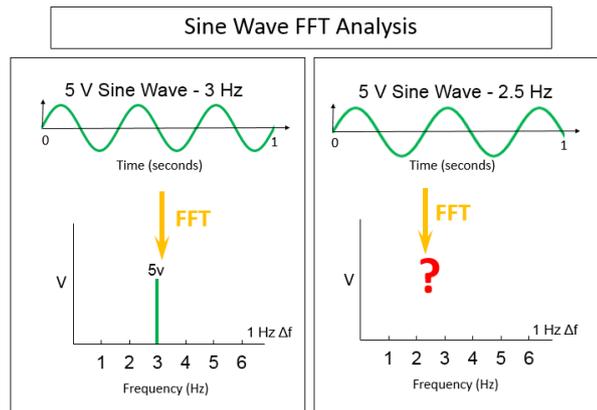
Grande parte das técnicas de processamento baseiam-se em transformações de funções entre dois espaços de definição. Como por exemplo, a transformada de *Fourier* transformar uma função no espaço temporal para um espaço cuja base são as funções complexas de senos e cossenos. Deste modo, o sinal é descrito no domínio da frequência através da sua composição em relação às funções que formam a base do espaço. A Transformada de *Fourier* se tornou o método mais importante no processo de sinais devido ao uso amplo e consolidado do espectro de frequência para análise de sinais (SILVA, 2013).

2.2 Transformada de Fourier e Janelamento (*Windowing*)

Silva (2013) em sua dissertação faz uma explanação sobre a transformada de Fourier, e cita que a usando a igualdade de Euler, pode-se escrever a série em termos de funções exponenciais complexas, sendo este formato o mais conhecido da série de Fourier. Também em sua dissertação, cita que a série de Fourier pode ser considerada um caso particular da Transformada de Fourier. Resumidamente, a transformada de Fourier tem como objetivo transformar um conjunto de dados do domínio do tempo, em dados no domínio da frequência, que são excelentes parâmetros para demonstrar as causas raízes de falhas em máquinas rotativas.

Um dos problemas que surgem com o processamento de sinais, é o vazamento espectral (em inglês, *spectral leakage*), que fazem com que os níveis de sinais sejam reduzidos e redistribuídos em uma ampla faixa de frequência (LYON, 2009). Basicamente, ocorrem se durante a transformação dos dados do domínio do tempo para a frequência, venha a obter como resultados, números que diferem de um número inteiro do período do sinal periódico, conforme Figura 1.

Figura 1 - Esquerda: FFT em onda senoidal de 3 Hz com amplitude correta em uma resolução de 1 Hz., Direita: Quando a onda senoidal não é um número inteiro da resolução da frequência.



Fonte: SIEMENS, 2017.

Um método bastante eficiente para o tratamento de sinais com caso de vazamento espectral, é o janelamento (em inglês, *windowing*), no qual afirma que, se algum intervalo for escolhido, ele retornará com valor não zero finito dentro desse intervalo e valor zero fora desse intervalo (FLÓREZ, CARDONA, & JORDI, 2009). Em Podder et al. (2014) é feito uma análise

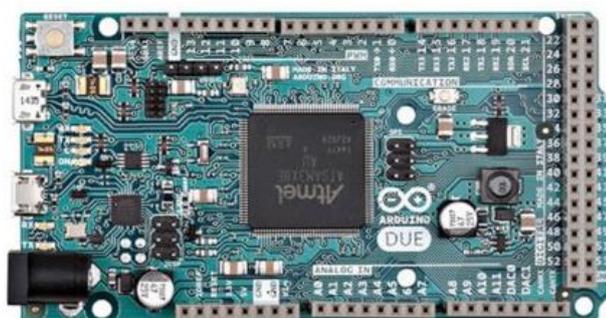
mais detalhada do funcionamento dos mais diversos tipos de janelamentos existentes, recomendando o janelamento de *Hannig* para análise de vibração em 95% de todos os casos.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Arduino DUE

Baseado no CPU (Central Process Unit) Atmel SAM3XBE ARM (Advanced Risc Machine) Cortex-M3, é a primeira placa baseada em um micro controlador ARM de 32 bits (Figura 2). Possui 54 pinos de E/S (Entradas/Saídas) digitais (sendo 12 com saídas PWM), 12 entradas analógicas, 4 portas seriais de hardware UARTs (Universal Asynchronous Receiver/Transmitter). Com clock de 84MHz (Mega Hertz), conexão compatível com USB OTG (Universal Serial Bus On The Go), 02 DAC (Digital to Analog Converter), 2 TWI (Two Wire Interface), conector de energia, cabeçalho SPE e JTAG (Joint Test Action Group), botões de reset e apagar (ARDUINO, 2018).

Figura 2 - Placa Arduino DUE.

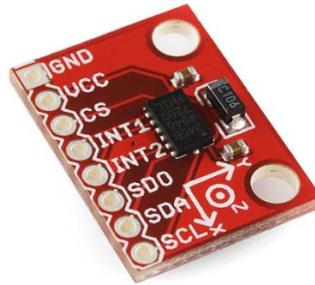


Fonte: ARDUINO, 2018.

3.2 ADXL 345

O ADXL345 (Figura 3) (ANALOG DEVICES, 2009) é um acelerômetro de 3 eixos com alta sensibilidade e com consumo de corrente extremamente baixo, aproximadamente 40 μA em modo de medição e 0,1 μA em modo de espera, e alimentação na faixa de 2 à 3,6V, facilitando o uso junto ao arduino (HALOVATYY et al., 2017). Trate-se de um equipamento pequeno e fino, com dimensões de 3x5x1 mm. É capaz de medir a aceleração estática da gravidade em aplicações de detecções de inclinações, bem como a aceleração dinâmica resultante de movimento, choque ou vibrações, com uma sensibilidade selecionável de $\pm 16g$ (DIVEKAR et al., 2017).

Figura 3 - Acelerômetro ADXL345.



Fonte: ANALOG DEVICES, 2009.

O acelerômetro pertence à classe de acelerômetros capacitivos. Com uma resolução fixa de 10 *bits*, e possibilitando a mudança de resolução para até 13 *bits* quando se mede acelerações de ± 16 . O sensor possui funções de detecção de impulsos simples e duplos e monitoramento de atividade / inatividade, além da capacidade de detectar queda livre. Com faixa de frequência de operação de 0,05 à 1600Hz, saída digital, protocolo de comunicação *SPI* e faixa de trabalho em temperaturas entre - 40 a 85 °C (HALOVATYY et al., 2017) e (ANALOG DEVICES, 2009).

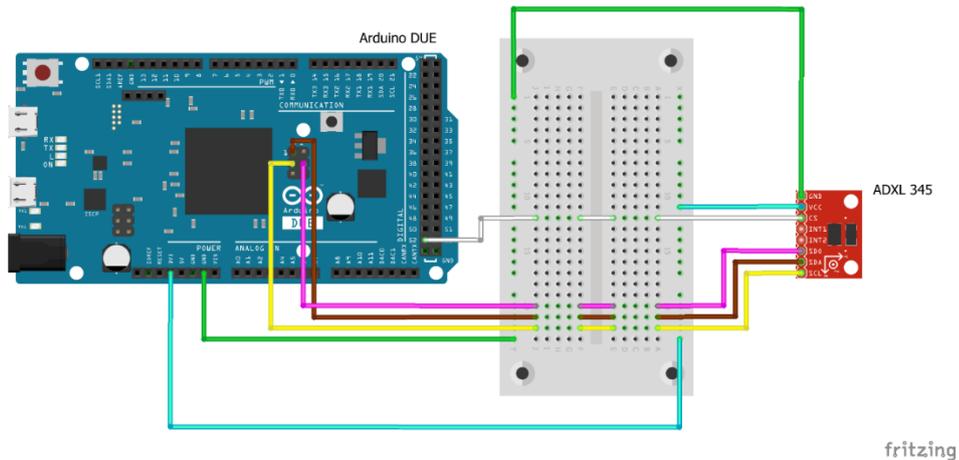
3.3 Montagem

A montagem do protótipo busca a simplicidade, trazendo maior facilidade para as conexões elétricas. Os pinos do arduino e do acelerômetro, respectivamente, foram conectados da seguinte forma:

- 3,3 – Vcc;
- GND – GND;
- 52 – CS;
- 74 – SDA;
- 75 – SDO;
- 76 – SCL.

A alimentação é feita pelos pinos 3,3 e GND. A comunicação e recepção dos dados são feitos pelos pinos analógicos 52 e SPI (74, e 75 e 76) conforme Figura 4. Para o desenho do esquema elétrico utilizou-se o *software Fritzing*.

Figura 4 - Esquema elétrico da ligação Arduino x Acelerômetro.



Fonte: Autor, 2018.

3.4 Programação

A programação é dividida em dois locais: no arduino e no *MatLab*. No arduino, é onde se inicia e configura o acelerômetro, o tipo de comunicação utilizada (*SPI*), a velocidade de comunicação e após esses procedimentos, os dados são enviados à porta serial. Neste tipo de programação, a utilização de bibliotecas já existentes, traz mais agilidade e facilidade na tarefa de programar, sendo basicamente necessário a escrita de comandos pré-definidos. Já na programação no *MatLab*, inicia-se utilizando comandos para liberar e ler a porta serial, obter dados e convertê-los de *bits* para *g* ou m/s^2 e após, tratar o sinal utilizando filtros. A programação traz maior dificuldade, sendo necessário o uso de diversos comandos e o cuidado essencial com o tamanho de alocação dos dados para não gerar qualquer erro. Apesar de haver a possibilidade de ser feita uma grande parte do tratamento dos dados no arduino, foi escolhido ser feita no *MatLab* devido a velocidade para executar a tarefa, sendo o segundo quase 50% mais rápido para executar estas tarefas específicas do que o primeiro. Vale citar que ambas programações são baseadas em linguagem C.

3.5 Funcionamento

De forma global, o protótipo cria os espectros de frequência no *MatLab*, com base nos dados enviados pelo acelerômetro, com a seguinte sequência:

- O micro controlador (arduino *DUE*) ativa o acelerômetro e altera os registros dos parâmetros de leitura e formatação dos dados (sensibilidade, *bits* e frequência de amostragem);

- O micro controlador lê uma amostra de aceleração obtida pelo acelerômetro e envia ao *software* (*MatLab*) de análise de sinais através da porta *USB* quatro dados sendo: “Sinc”, “valor eixo X”, “Valor eixo Y” e “Valor eixo Z”;
- O *MatLab* inicia a comunicação com a porta *USB* e cria um vetor chamado “a” onde armazena temporariamente tudo que chega pela porta *USB*, que é transformado em um formato *string*;
- Utilizando um ciclo *while*, compara a variável “contador de amostras” até ser igual ao número de amostras definido, usando como ordem de leitura a variável “Sinc”;
- Quando a variável “Sinc” é encontrada, cria e a armazena em uma outra variável denominada “Resto”;
- Cria três variáveis chamadas eixoX, eixoY e eixoZ, que armazenam os outros três dados enviados pelo micro controlador pela porta *USB*, transformando-os em um formato em valores de precisão dupla (comando *str2double*);
- Verifica, através do comando *isnum*, se os valores das variáveis eixoX, eixoY e eixoZ são numéricos, se forem armazenam os valores nos vetores VetorX, VetorY e VetorZ, respectivamente. Caso não sejam numéricos, acusam erros, armazenando na variável “contador de erros” e inicia-se um novo ciclo de leitura.
- Calcula a aceleração real ($Acel_{real}$ de cada eixo) e dos valores de *offset* e *ScalingFactor*, com a formula oferecida pelo fabricante (ANALOG DEVICES, 2009);

$$Acel_{real} = \frac{Acel_{MEMS} - offset}{ScalingFactor}$$

- Calcula a *FFT* e cria os três espectros de frequência;
- Aplica a janela de *Hann*;
- Plota os seguintes gráficos: sinais de cada eixo (VetorX, VetorY e VetorZ) já considerando o cálculo de aceleração real; as *FFT's* de cada eixo antes da janela de *Hann* e após a janela;
- Salvar os dados de aceleração (VetorX, VetorY e Vetor Z) em um arquivo .xls.

3.6 Ensaio em motor elétrico

Para o teste do protótipo, foi utilizado um motor elétrico trifásico, 60 Hz, 850 rpm. Além do motor, também utilizou de uma estrutura metálica (Figura 5) com furos nas extremidades, acoplada ao eixo do motor. Com esses dois itens e mais um parafuso em um dos

furos na extremidade da estrutura metálica, é possível simular um desbalanceamento no motor, obtendo resultados previsíveis, e assim, sendo possível validar os resultados obtidos pelo protótipo.

Figura 5 - Acoplamento com furos.



Fonte: Autor, 2018.

4 RESULTADOS

Com as especificações do motor, 850 rpm, é possível converter a velocidade para *Hertz*, através da equação $Hz = \frac{rot}{60 \text{ segundos}}$. Calculando, encontra-se o resultado de 14,16 *Hz*. Acoplado o protótipo, utilizando fita auto adesiva, conforme Figura 6, e ligando o motor, obtém-se os dados de vibração.

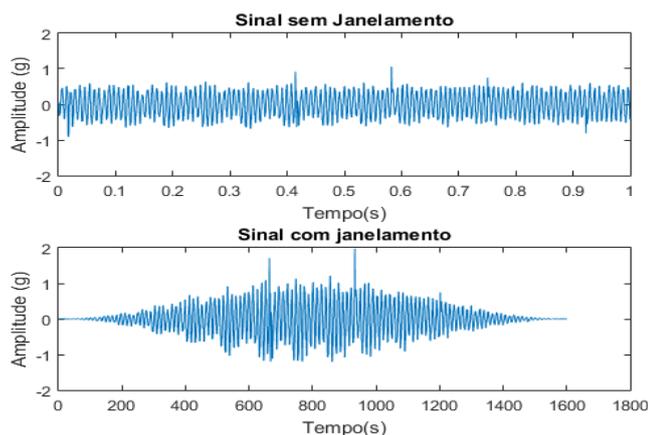
Figura 6 - Protótipo instalado no motor.



Fonte: Autor, 2018.

Na Figura 7, a amplitude é dada em g ($9,81 \text{ m/s}^2$) e o eixo x em segundos, demonstrando o sinal obtido em um segundo de dados. No gráfico com janelamento, é possível observar a característica predominante do método de Hann, que é as extremidades do gráfico em 0. Este mesmo gráfico, tem no eixo x a quantidade de dados obtidos (1600).

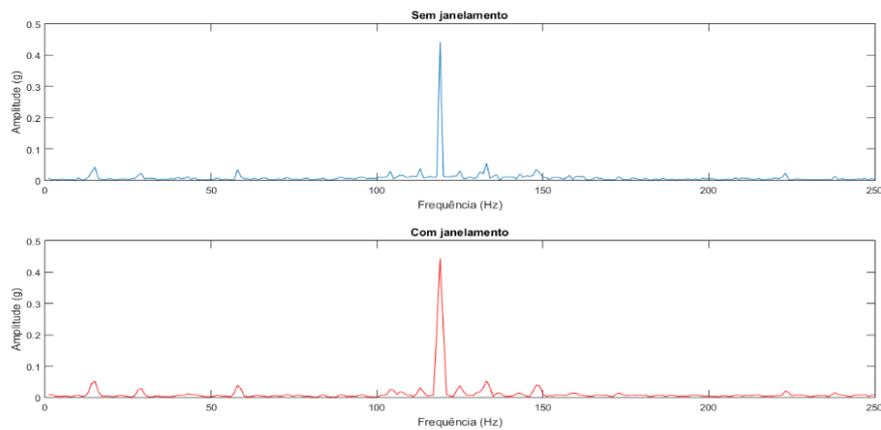
Figura 7 - Sinais de aceleração em g.



Fonte: Autor, 2018.

No caso da Figura 8, têm-se ambas as amplitudes no domínio da frequência. O primeiro, em azul, trata-se do sinal sem janelamento e o segundo com janelamento. É possível observar que ambos os sinais tiveram resultados próximo ao esperado. Temos como características destes gráficos, o primeiro pico de frequência em 15 Hz, demonstrando o desbalanceamento do motor. Outros picos são as harmônicas. O pico maior, em 119 Hz, é referente à, aproximadamente, duas vezes o valor da frequência da tensão da rede elétrica (60 Hz – 120 Hz), valor já esperado segundo Filho (2007).

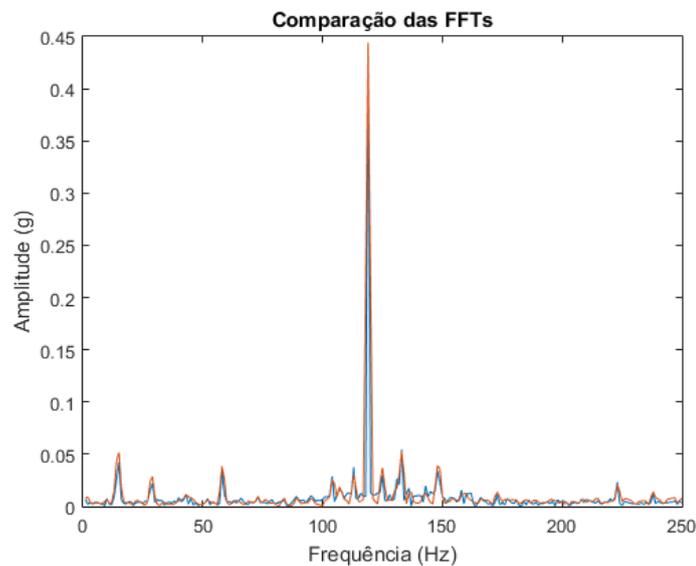
Figura 8 - Sinais de aceleração processados (FFT).



Fonte: Autor, 2018.

Já a última, figura 9, é notado a diferença entre os sinais com (em vermelho) e sem (em azul) janelamento. Pode-se perceber um melhor desenho dos espectros de frequência, sendo mais fino e com maior amplitude em vermelho, indicando os efeitos positivos do janelamento.

Figura 9 - Comparação entre as FFT's.



Fonte: Autor, 2018.

5 CONCLUSÃO

O arduino é um equipamento que possibilita uma fácil programação e prototipagem, trazendo uma infinidade de possibilidades de aplicações. Usando seu rápido processamento e reduzido tamanho, torna-se uma importante ferramenta na busca de reduções de custos no

desenvolvimento de outros equipamentos, como por exemplo, um medidor de vibração. A criação de medidor de vibração, é possibilitado também pelo acelerômetro, que se tornou indispensável neste processo, trazendo consigo características importantíssimas de operação, como sua larga faixa de temperaturas e certa robustez contra choques e ambientes adversos.

Apesar de obter uma boa precisão, é possível em um futuro próximo melhorá-la ainda mais, com melhores práticas de desenvolvimento de equipamentos MEMS. No atual estágio de funcionamento e precisão, podem ter um importante papel no monitoramento preditivo, diminuindo custos e funcionamento como forma primária de avaliação em máquinas. A comparação de custos do protótipo (R\$ 250,00) com equipamentos já consolidados no mercado (HHVB82 – OMEGA – R\$ 6.110,00) mostra uma grande diferença de valores, sendo o valor do protótipo aproximadamente, 4,09% do valor do medidor da Omega.

Os medidores que tem um preço elevado, podem ter resultados alcançados por dispositivos com preços menores, trazendo ainda como benefício a possibilidade de mudança na programação, e acoplamento de acessórios que agreguem outras funções como conexões a distância e gravação de dado para monitoramento em tempo real. Funções que possam trazer mais comodidade, segurança e benefícios ao usuário final e a sociedade.

REFERÊNCIAS

- ANALOG DEVICE. **ADXL 345**: Data sheet. 2009. Disponível em: <<https://www.sparkfun.com/datasheets/Sensors/Accelerometer/ADXL345.pdf>>. Acesso em: 01 maio 2017.
- ARDUINO. **Arduino**: Due. 2018. Disponível em: <<https://www.arduino.cc/en/guide/introduction>>. Acesso em: 01 maio 2018.
- ARDUINO. **Arduino**: Introdução. 2018. Disponível em: <<https://www.arduino.cc/en/guide/introduction>>. Acesso em: 01 maio 2018
- BHUGRA, Harmeet; PIAZZA, Gianluca. **Piezoelectric MEMS resonators** . Switzerland: Springer International, 2017. 423 p.
- CHAUDHURY, Subimal Bikash; SENGUPTA, Mainak; MUKHERJEE, Kaushik. Vibration Monitoring of Rotating Machines Using MEMS Accelerometer. **International Journal of Scientific Engineering and Research (IJSER)** , India, 09 set. 2014. Electrical Engineering - Vol.2, p.
- DESHMUKH, Ajay V. **Microcontrollers**: Theory And Applications. 6. ed. India: Tata McGraw-Hill, 2007. 335 p.
- DIVEKAR, Priti et al. Vibration measurement using accelerometer and arduino. **International Journal of Recent Innovation in Engineering and Research** , Índia, 31 mar. 2017. Scientific Journal Impact Factor, p. 3. Disponível em: <<https://ijrier.com/published-papers/volume-2/issue-3/vibration-measurement-using-accelerometer-and-arduino-2.pdf>>. Acesso em: 05 jun. 2018.
- EISENMANN, R.C; EISENMANN, R.C. Jr. **Machinery Malfunction Diagnosis and Correction**: Vibration Analysis and Troubleshooting for Process Industries. 1. ed. Nova Jersey, EUA: Prentice Hall, 1997. 820 p.
- FILHO, Paulo Cezar Monteiro Lamim. **Monitoramento Permanente de Motores de Indução Trifásicos**. 2007. 148 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica)- Faculdade de Engenharia Mecânica, UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS, Campinas, 2007. Disponível em: <http://repositorio.unicamp.br/bitstream/REPOSIP/265206/1/LamimFilho_PauloCezarMonteiro_D.pdf>. Acesso em: 23 ago. 2018.

FLÓREZ, Elkin; CARDONA, Salvador; JORDI, Lluïsa. Selección de la ventana temporal en la transformada de Fourier en tiempos cortos utilizada en el análisis de señales de vibración para determinar planos en las ruedas de un tren. **Revista Facultad de Ingeniería Universidad de Antioquia** , Medellín, p. 145-158, dez. 2009. Disponível em: <<https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=43016338013>>. Acesso em: 20 ago. 2018.

GONZÁLEZ, Roberto Carlos Díaz. **Desenvolvimento de um protótipo analisador de vibração de baixo custo para uso em manutenção preditiva** . 2014. 106 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica)- Universidade Federal de Santa Catarina, FLORIANÓPOLIS, 2014.

HOLOVATYY, A. et al. Development of a system for monitoring vibration accelerations based on the raspberry pi microcomputer and the adxl345 accelerometer. **EasternEuropean Journal of Enterprise Technologies** , Ukraine, v. 6, p. 52-62, abr. 2017. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/317293600_Development_of_vibration_spectrum_analyzer_using_the_Raspberry_Pi_microcomputer_and_3-axis_digital_MEMS_accelerometer_ADXL345>. Acesso em: 05 jun. 2018.

JÚNIOR, Geraldo Motta Azevedo et al. Estudo sobre a manutenção preditiva em motores trifásicos através da análise de vibrações. **Projectus**, Rio de Janeiro, v. 1, n. 4, p. 70-83, dez. 2016. Disponível em: <<http://apl.unisuam.edu.br/revistas/index.php/projectus/article/view/1642>>. Acesso em: 15 ago. 2018.

LIAO, Wenshuai; ZHAO, Yiming. Using dual-axis accelerometers to protect hard disk drives. **Analog Dialogue Technical Journal** , [S.l.], v. 39, n. 4, p. 1-4, nov. 2005. Disponível em: <<https://www.analog.com/media/en/analog-dialogue/volume-39/number-4/articles/using-accelerometers-to-protect-hard-drives.pdf>>. Acesso em: 23 ago. 2018.

LYON, Douglas. The discrete fourier transform: part 4: spectral leakage. **JOURNAL OF OBJECT TECHNOLOGY** , Zurich, v. 8, n. 7, p. 23-34, dez. 2009. Disponível em: <http://www.jot.fm/issues/issue_2009_11/column2.pdf>. Acesso em: 23 ago. 2018.

MARAN, Marcos. **Manutenção baseada em condição aplicada a um sistema de ar condicionado como requisito para sustentabilidade de edifício de escritórios**. . 2011. 121 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Construção Civil e Urbana)- Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2011.

PODDER, Prajoy et al. Comparative Performance Analysis of Hamming, Hanning and Blackman Window. **International Journal of Computer Applications** , [S.l.], v. 96, n. 18, p. 1-7, jun. 2014. Disponível em: <<https://research.ijcaonline.org/volume96/number18/pxc3896927.pdf>>. Acesso em: 20 ago. 2018.

SCHULTZ, B.G; VAN VUGT, F.T. Tap Arduino: An Arduino microcontroller for low-latency auditory feedback in sensorimotor synchronization experiments. **Behavior Research Methods** , [S.l.], p. 1591-1607, dez. 2016. Disponível em: <<https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/26542971>>. Acesso em: 20 ago. 2018.

SHIN, Kihong; HAMMOND, Joseph. **Fundamentals of signal processing for sound and vibration engineers** . 1. ed. Chichester: Wiley, 2008. 416 p.

SIEMENS. .. **Siemens ingenuity for life** : Windows and spectral leakage. 2017. Disponível em: <<https://community.plm.automation.siemens.com/t5/Testing-Knowledge-Base/Windows-and-Spectral-Leakage/ta-p/432760>>. Acesso em: 23 ago. 2018.

SILVA, Derick Henrique de Jesus. **Processamento de sinais para monitoramento de vibrações em unidades geradoras hidrelétricas** . 2013. 119 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica)- Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2013.

SODANO, Henry A.; INMAN, Daniel J.; PARK, Gyuhae. A review of power harvesting from vibration using piezoelectric materials. **The Shock and Vibration Digest** , [S.l.], p. 197-205, maio. 2004. Disponível em: <<http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.594.3784&rep=rep1&type=pdf>>. Acesso em: 05 jun. 2018.

TRESSENO, Marcelo. **Modelagem matemática não paramétrica de elastomassas MEMS em colapso utilizando signature** . 2014. 131 p. Dissertação (Mestrado em Modelagem Matemática)- Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul, Ijuí, 2014.

WANG, Wilson. An intelligent system for machinery condition monitoring. **IEEE Transactions on Fuzzy Systems** , [S.l.], v. 16, n. 1, p. 110-122, fev. 2008. Disponível em: <<https://ieeexplore.ieee.org/document/4358803>>. Acesso em: 15 ago. 2018.