Plataforma de Hardware e Código Abertos para Extração de Parâmetros de Vibração em Máquinas Industriais

Rebeca Lima
Faculdade de Tecnologia
Senai CIMATEC
Salvador, Bahia
Email: rebeca.lima@fieb.org.br

Lucas Silva
Faculdade de Tecnologia
Senai CIMATEC
Salvador, Bahia
Email: lucas.cs@fieb.org.br

Eudemario Santana
Faculdade de Tecnologia
Senai CIMATEC
Salvador,Bahia
Email: eudemario.santana@fieb.org.br

***Abstract*—Uma das abordagens mais tradicionais no que diz respeito à manutenção preditiva de máquinas industriais é o monitoramento de vibrações, onde a análise dos dados obtidos permite a avaliação de desempenho e condições de operação de tais equipamentos, evitando paradas de produção não-planejadas. No entanto, os instrumentos comerciais possuem, além de custo elevado, *softwares* proprietários e pouca (ou nenhuma) flexibilidade em seus *hardwares*. O objetivo deste trabalho, portanto, é desenvolver um sistema embarcado para medição de vibração sobre plataforma e código livres. A metodologia utilizada inclui o levantamento de requisitos e componentes, projeto de circuito impresso, montagem e desenvolvimento de *software*. Ao final, são apresentados os resultados obtidos com a plataforma fabricada.**

I. Introdução

A. Contextualização

As vibrações, também conhecidas por oscilações, estão presentes de diversas formas no nosso cotidiano e são representadas por todo e qualquer movimento periódico. Um pêndulo em movimento ou uma onda sonora são exemplos básicos. Uma das áreas de interesse no estudo das vibrações é a engenharia envolvida no projeto de máquinas, fundações, estruturas, motores, turbinas, sistemas de controle e manutenção industrial. Motores, por exemplo, tem problemas de vibração devido a desbalanceamentos de rotores, o que pode ser ocasionado por falhas de projeto, manutenção inadequada ou desgaste natural [1].

As vibrações reduzem a vida útil de peças como rolamentos e engrenagens, elevando os custos de manutenção; representam perdas de energia diminuindo a eficiência das máquinas e, quando geram ruídos audíveis intensos, podem tornar o ambiente de trabalho insalubre. Outra consequência das vibrações em máquinas é o surgimento de folgas em elementos de fixação, gerando trepidações e pontos de aquecimento, ocasionando desde desalinhamentos a princípios de incêndio, caso especialmente crítico em áreas classificadas. Apesar dos danos que as vibrações podem trazer, elas também podem ser utilizadas propositalmente em várias aplicações industriais como em esteiras transportadoras, peneiras, compactadores, máquinas de lavar, ferramentas odontológicas, bate-estacas e instrumentos musicais, desde que devidamente projetadas para isto [1].

B. Revisão Bibliográfica

No que diz respeito a sistemas embarcados para análise de vibrações, um dos trabalhos nesta área consistiu no desenvolvimento de um sistema de medição de vibração de máquinas rotativas em tempo real, do tipo motor de indução com rotor em gaiola, com foco na detecção de falhas em rolamentos [2]. O sistema foi desenvolvido em linguagem VHDL aplicada a um dispositivo FPGA (*Field Programmable Gate Arrays*). Consiste em uma plataforma computacional reconfigurável que se propõe a oferecer uma solução de compromisso entre as vantagens de performance de um hardware dedicado e a flexibilidade dos substratos programáveis via software, previamente modelado e simulado em ambiente Simulink/MATLAB®.

Outro trabalho [3] propõe um sistema microcontrolado embarcado de baixo custo dedicado à análise de vibrações de máquinas rotativas através de técnicas de tempo médio síncrono (TSA), indexação numérica e análise espectral como a FFT e a transformada *Wavelet* discreta (DWT). O sistema consiste de: sensores acelerômetros; estágio de condicionamento de sinais; filtragem e conversão analógico-digital (A/D) e microprocessador com *firmware* desenvolvido em linguagem C. Os filtros foram projetados com ferramentas próprias do MATLAB®. O citado trabalho aponta que os testes com o sistema proposto trouxeram bons resultados na detecção de falhas e diagnóstico e ainda realiza um comparativo entre as características da plataforma e as de produtos comerciais.

Ainda no contexto da instrumentação eletrônica, é válido mencionar o destaque que os sistemas *open source hardware* (OSH) vem ganhando na comunidade em geral, particularmente desde 2006 com o lançamento do Arduino [4]. Embora a terminologia *open source* seja uma expressão originalmente associada ao campo de *software*, atualmente ela pode ser estendida a projetos de *hardware* incluindo *layout* de placas de circuito impresso, *layout* de fotolitos, esquemáticos eletroeletrônicos e desenhos mecânicos. Os benefícios de um

projeto OSH incluem o baixo custo, a criação e crescimento de uma comunidade de desenvolvedores e consequentemente de fóruns de discussão, uma maior disponibilidade de recursos, vasta documentação e a possibilidade de melhoria contínua, sem falar na flexibilidade de *redesign* de partes eventualmente descontinuadas [5]. No citado documento, são listados, inclusive, mais de 15 projetos OSH na área de instrumentação e medição como microscópios, galvanômetros, válvulas de controle, registradores e medidores de energia *wireless*, aeromodelos autônomos, entre outros. Por outro lado, esse processo colaborativo e de livre acesso requer uma organização muito maior e mais robusta, assim como um meio de *backup* pois as chances de os usuários se confundirem com atualizações ou mesmo iniciarem um projeto, aumenta dada a dinamicidade dessas múltiplas interações. Portanto, é importante a utilização de softwares de versionamento e repositórios públicos, a exemplo de um dos mais populares na atualidade como o GitHub ou do BitBucket, gratuito para até 5 colaboradores por conta [6].

Por fim, em outro trabalho, discute-se a potencialidade oferecida por plataformas *open source hardware*, a exemplo do projeto Arduino, para o campo da pesquisa científica e instrumentação. Os autores propõem um conjunto *hardware* e *software* com o objetivo de coletar dados (*datalogger*) de monitoramento de solo. Os principais componentes utilizados no desenvolvimento deste *datalogger* foram a plataforma Diavolino - compatível com Arduino - e uma placa auxiliar (*shield*) do tipo micro SD, além de um relógio de tempo real com comunicação I^2C e reguladores de tensão [7].

C. Objetivo

Este trabalho propõe o desenvolvimento de instrumento de medição para monitoramento de vibrações. Sabe-se que o monitoramento de vibrações se trata de uma importante ferramenta de manutenção preditiva, visto que sua análise permite a antecipação de falhas e identificação de possíveis fontes de redução de desempenho e perdas, além da identificação de problemas estruturais que envolvem as máquinas rotativas. Portanto, neste artigo é apresentado um dispositivo eletrônico embarcado portátil e de baixo custo que proporciona medições de oscilações mecânicas em máquinas rotativas e permite ao usuário transferir os dados adquiridos, por exemplo, a um computador para futuros tratamentos, compor um histórico e gerar documentação.

Este artigo está organizado como segue: na seção II descreve os conceitos a cerca de medição de vibração; a seção III trata da implementação do dispositivo; a seção IV descreve os resultados obtidos com o protótipo e por fim, a seção V apresenta conclusões sobre a implementação do sistema.

II. Conceitos

O estudo de vibração engloba três processos: a medição de vibração, a análise do sinal vibratório medido e o controle da vibração. A medição de vibração envolve algumas etapas para ser realizada. A primeira consiste na conversão da grandeza mecânica em grandeza elétrica, o que é feito por um transdutor, i.e., a oscilação captada é traduzida em resistência, tensão, corrente, indutância ou capacitância a depender do dispositivo utilizado. A etapa seguinte é fazer uma equivalência entre a variação mecânica obtida em uma variação de tensão ou corrente elétrica, o que, a depender do transdutor (*strain gauge*, por exemplo), pode ser da ordem de microvolts e/ou microampères [8]. Muitas vezes, se faz necessário um estágio intermediário de condicionamento do sinal para que este seja adequadamente proporcional ao deslocamento original através de amplificação, demodulação, filtragem, integração, adição ou subtração de sinais. A etapa seguinte consiste em armazenar os registros de medição para que estes dados sejam acessíveis posteriormente, o que permite a análise dos sinais obtidos.

Algumas aspectos são considerados na escolha de um instrumento de medição [9]:

- Faixa de frequência e amplitude: Em baixas frequências a amplitude dos deslocamentos é relativamente alta, fazendo com que os vibrômetros sejam mais adequados para medir vibrações. Já em altas frequências, as amplitudes dos deslocamentos são bem menores enquanto as amplitudes de aceleração são altas, indicando uma melhor aplicação de acelerômetros. A medição de velocidade, por sua vez, apresenta um desempenho intermediário, sendo largamente utilizados por serem de fácil e barata construção;
- Tamanho da máquina ou estrutura: O tamanho relativo entre o sensor e o objeto da medição pode influenciar nos resultados distorcendo-os e deve ser avaliado;
- Condição de operação da máquina: Ambientes corrosivos, abrasivos ou com outras condições severas, podem não ser compatíveis com o instrumento de medição que se pretende utilizar;
- Tipo de análise de dados: o tipo de dados dependerá da análise pretendida.

Os transdutores existem para medir os três tipos de parâmetros no qual a vibração pode ser expressada: deslocamento, velocidade e aceleração. A escolha do transdutor leva em consideração aspectos como linearidade, faixa de frequência, ressonância ou impedância elétrica. Os acelerômetros, por exemplo, possuem uma faixa para a qual a amplitude não se altera com a variação da frequência. Além disso, eles apresentam uma razão linear entre entrada e saída, o que se mostra mais vantajoso no que diz respeito ao erro da medição. Embora não-linearidades possam ser compensadas computacionalmente, como ocorre em outros tipos de transdutores, este recurso implica em uma maior complexidade do sistema de medição. Segundo Randall [10], alguns dos principais tipos de transdutores são:

- Sensores de proximidade;
- Transdutores de velocidade;
- Acelerômetros;
- Sensores de vibração dual;
- Vibrômetros a *laser*.

Os acelerômetros, componentes utilizados neste trabalho, são transdutores que produzem um sinal proporcional à

aceleração. Os tipos mais comuns usados em monitoramento de vibração em máquinas são os piezoelétricos, os quais fazem uso de propriedades piezoelétricas de certos cristais e cerâmicas. Esses elementos geram uma carga elétrica proporcional à deformação. Quando a base do acelerômetro é conectada a um objeto vibrante, a massa é forçada a seguir o movimento da base que age como uma mola bem rígida. A variação inercial da força da massa causa uma ligeira deformação no elemento piezoelétrico, apresentando uma equivalente variação em aceleração. Elas produzem uma carga proporcional a essa aceleração na qual a sensibilidade é estimada em picocoulombs por metro segundo ao quadrado, $pC/(m \cdot s^2)$.

Uma das principais vantagens dos acelerômetros é a sua ampla faixa (*range*) tanto em frequência quanto em amplitude. A faixa de frequência dinâmica típica de um acelerômetro é de 160 dB, embora com o uso de amplificadores ele possa ser reduzido a 120 dB. A faixa de frequência varia de 10 Hz a 20 kHz apesar de 1 Hz ainda ser considerada válida [10].

III. Implementação do Sistema

Começando pela escolha do sensor acelerômetro, como visto na seção II, sabe-se que eles alcançam uma ampla faixa de frequência e amplitude, sendo bastante utilizados para monitoramento de vibrações e comumente encontrados em instrumentos de medição comerciais. Além disso, alguns modelos de baixo custo deste tipo de sensor são capazes de atender a faixas de aceleração próximas às praticadas por alguns destes instrumentos, por exemplo $\pm$20,39 g[1] [12]. Optou-se então pelo sensor de modelo ADXL345 do fabricante Analog Devices [13], um acelerômetro digital triaxial capaz de medir acelerações estáticas e dinâmicas de $\pm$16 g com resolução de até 13 bits e interface de comunicação SPI/I^{2}C, de baixo custo e relativa facilidade de aquisição no mercado por ser difundido entre usuários da plataforma Arduino.

Contabilizando o número de portas I/Os para a interface, comunicação I^{2}C para o sensor e SPI para o cartão de memória, optou-se por um microcontrolador 16 bits da família dsPIC33F, produto da empresa Microchip voltado ao processamento digital de sinais com grande variedade de módulos (periféricos), incluindo os de comunicação já citados, espaço em memória e execução de instruções de até 40 MIPS, com menor custo em relação aos microcontroladores de 32 bits. Parte da escolha também pode ser atribuída ao caráter *freeware* das licenças da IDE e compilador oferecidos pelo fabricante (MPLAB e XC16, respectivamente).

Com isso, escolheu-se o modelo dsPIC33FJ64GP706 por ser um *hardware* com capacidade de operação de até 40 MIPS, memórias RAM e de programa de 16 e 64 Kbytes, respectivamente, provido de portas SPI, I^{2}C, *timers* de 16 bits, mais de 50 pinos de I/O, entre outras funcionalidades. Foi, além disso, um modelo fácil aquisição no mercado nacional.

Os demais requisitos estabelecidos para este protótipo foram a existência de uma interface simples com o usuário constituída por um *display* LCD e um teclado com 3 botões sobre a qual se executa um menu de seleção. A figura 1 resume a proposta na forma de diagrama funcional da plataforma, porém de maneira genérica e independente da aplicação. Já a figura 2 apresenta o esquemático do medidor de vibração implementado.

Fig. 1. Diagrama funcional da plataforma genérica.

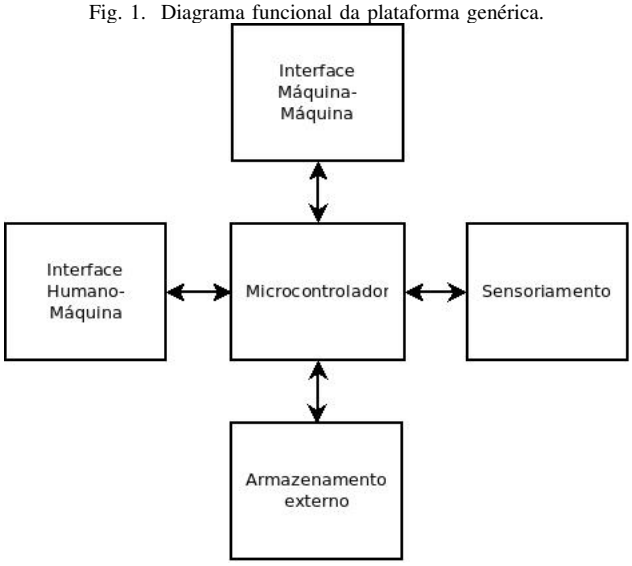
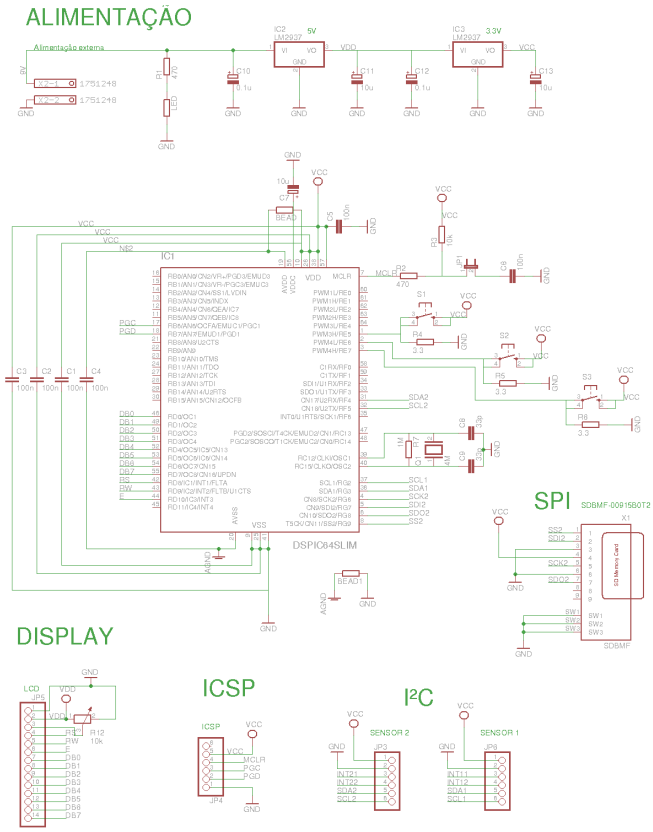


Fig. 2. Esquemático do Medidor de Vibração.



O *firmware* do dispositivo foi desenvolvido em linguagem

[1]g é uma unidade de aceleração definida como 9,80665 m/s^2 [11].

C em uma estrutura de blocos funcionais que deveriam contemplar o algoritmo de interação com o usuário e o processo de aquisição e exibição das medições. A construção das bibliotecas de funções foi feita de forma modularizada com intuito de serem aproveitadas em outras aplicações cumprindo o propósito de *Open Source Hardware*.

A parametrização do sensor através foi realizada conforme os seguintes requisitos:

- Taxa de transmissão de 3200 Hz;
- Banda de 1600 Hz;
- Resolução máxima (*full*) com razão de 4 mg/bit;
- Faixa de aceleração de +/- 16 g;
- Modo de consumo de energia normal.

O desenvolvimento do medidor culminou no protótipo ilustrado na figura 3

Fig. 3. Protótipo do medidor de vibração.

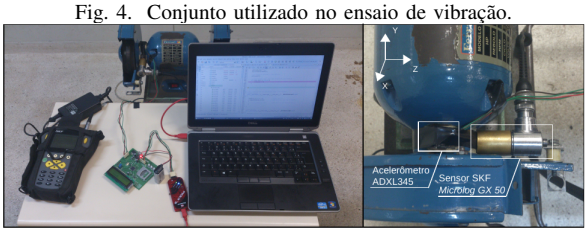
IV. Resultados

A principal parte dos testes se reservou ao ensaio executado no Laboratório de Vibrações do Senai CIMATEC. Uma vez constatado o funcionamento do dispositivo Medidor de Vibração nos testes de medição de aceleração estática (envolvendo a medição da aceleração da gravidade emr elação aos 3 eixos do sensor), o objetivo dos testes em laboratório foi efetuar medições de vibração dinâmica em uma máquina rotativa, em ambiente controlado, para comparar as medidas obtidas pelo protótipo com aquelas obtidas a partir de um instrumento comercial.

O ensaio foi realizado a partir do kit Simulação de Defeito Balanceamento (NPDT Bancada 4) que pode ser visto na figura 4. Este kit é composto por um motor elétrico do fabricante Ferrari, modelo ME-8A, cujos parâmetros nominais são: potência de 3/4 HP, rotação de 3450 RPM, frequência de 60 Hz, tensão 110/220 V. Já o instrumento comercial utilizado como referência foi o *Microlog CMXA 50 - GX Series* da SKF [14].

Neste conjunto, o desbalanceamento foi provocado pela inserção de duas pequenas massas (2 porcas) em apenas um dos lados do eixo do motor, causando uma vibração de baixa intensidade, porém notável em relação ao regime normal de operação. Os sensores de cada dispositivo foram fixados em torno da mesma região da carcaça do motor: o sensor do

Fig. 4. Conjunto utilizado no ensaio de vibração.



Microlog foi posicionado paralelamente ao chão, captando vibrações no sentido transversal ao eixo do motor como pode ser visto na figura 4 e o sensor do protótipo (ADXL345), portanto, teve o seu eixo Z alinhado a esta mesma direção permitindo a posterior comparação dos dados.

No ensaio, as medições do *Microlog* foram tomadas com amostragem de 400 Hz, exibição gráfica dos pontos e cálculo do valor RMS (*root mean square*). Uma vez que o gráfico gerado neste instrumento não pôde ser exportado devido à indisponibilidade do *software* de análise do aparelho no laboratório, o meio de comparação entre os resultados do instrumento e do Medidor de Vibração foi a raiz quadrática média dos valores. Portanto, para os dados do protótipo, o valor RMS associado foi calculado conforme a equação 1, onde N representa a quantidade de amostras e x_n o valor de cada amostra.

$$x_{rms} = \sqrt{\frac{1}{N} \times \sum_{1}^{N} {x_n}^2} \tag{1}$$

Os valores iniciais (*offset*) de vibração medidos em cada eixo, ou seja, antes da partida no motor, foram tomados conforme a tabela I:

TABLE I
VIBRAÇÕES OBTIDAS NO MOTOR EM REPOUSO DURANTE ENSAIO.

	Offset de Vibração (mg)
Eixo X	1048
Eixo Y	0
Eixo Z	-150

As medidas tomadas pelo instrumento *Microlog* foram apenas em uma dimensão, o que nas medições com o protótipo, como dito acima, equivaleram à coordenada Z. Devido à característica triaxial do ADXL345, no entanto, obteve-se também as medições referentes aos eixo X e Y. Ao realizar a compensação de *offset* e calcular o valor RMS do intervalo obtido para a coordenada Z, obteve-se 0,584 g, enquanto o *Microlog* registrara 0,538 g.

Esse resultado corresponde a uma diferença de aproximadamente $8,6\%$ entre a medição do protótipo e a medição deste instrumento que foi tomado como referência e que é utilizado no laboratório de vibrações do SENAI CIMATEC. Mesmo não tendo sido possível mensurar o erro associado ao próprio *Microlog*, o que, portanto, contribui para o erro global, a norma ISO 2954, por exemplo, determina que o erro de medição de

um medidor de vibração deve ser de no máximo $\pm 10\%$ do valor de referência [15].

Fig. 5. Gráfico das vibrações em X no motor desbalanceado.

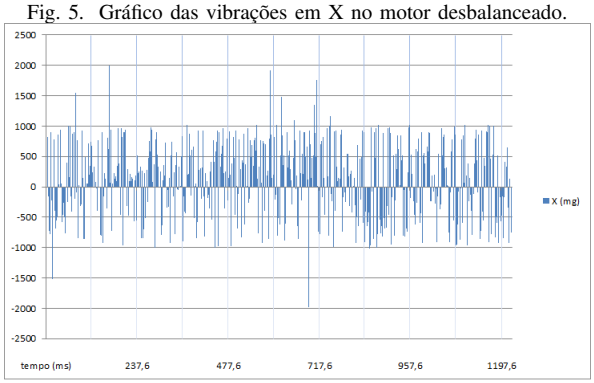


Fig. 6. Gráfico das vibrações em Y no motor desbalanceado.

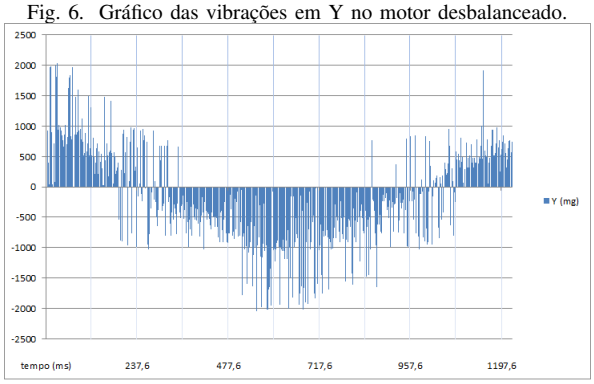
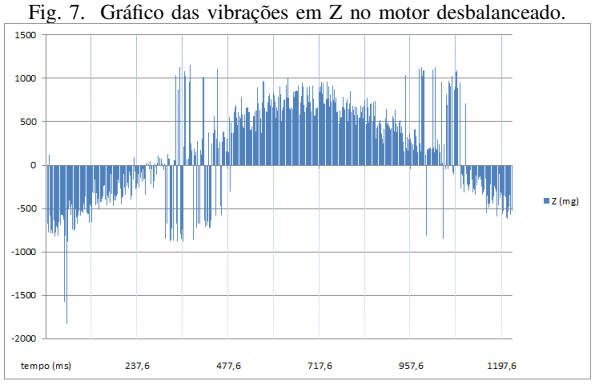


Fig. 7. Gráfico das vibrações em Z no motor desbalanceado.



O resultado gráfico das medidas obtidas pelo protótipo nas três coordenadas durante o ensaio e já corrigidas de seus respectivos valores de *offset* pode ser visto nas figuras 5, 6 e 7. Nota-se que as vibrações referentes ao eixo X são as de menor intensidade, visto que a coordenada coincide com a base de fixação do motor. Os dados referentes ao eixo Y e Z são semelhantes mas somente este último pôde ser avaliado.

Observando a curva obtida para o eixo Z, pode-se notar o perfil de uma curva oscilatória. Além disso, sabendo-se que o valor RMS de uma senoide pura corresponde a $V_{pico}/\sqrt{2}$, se, por inspeção visual, tomarmos como valor de pico aproximadamente 800 mg, o valor RMS será de aproximadamente 0,565 mg, o que corresponde a uma diferença de $5,0\%$ em relação ao que foi registrado pelo *Microlog*.

A. Repositório

Cumprindo um dos objetivos deste trabalho, foram disponibilizados em repositório público - https://github.com/rebecatourinho/opencimatec - os arquivos desenvolvidos no *software* EAGLE v6.5.0 [16] referentes ao *hardware* (esquemático, placa de circuito impresso e lista de materiais) de uma versão com recursos adicionais (módulos PWM, ADC, UART/RS232 e ECAN) e os arquivos de programação do MPLAB X IDE [17] referentes ao *firmware* do medidor de vibração, compatíveis com o citado *hardware* e cujas bibliotecas podem ser reutilizadas para outras aplicações. Além disso, os autores estão à disposição para contato e colaboração.

V. Conclusões

Neste artigo, foi apresentado um dispositivo contendo sistema embarcado *Open Source Hardware* capaz de realizar medições de vibração. Os gráficos exibidos na seção IV apontam para o funcionamento esperado do protótipo para o propósito de medição de vibração, por meio da realização de testes dinâmicos, que apresentou medições próximas às de um instrumento comercial.

Apesar da maior abrangência dos trabalhos apresentados na revisão bibliográfica em termos de instrumentação, este trabalho se propôs apenas à execução e validação da etapa inicial deste processo, ou seja, a medição de uma grandeza, neste caso a vibração. Contudo, optou-se pelo uso de sensores acelerômetros para a aplicação proposta e microcontrolador programado em linguagem C como feito por Merendino [3]. Embora não tenha incorporado etapas subsequentes como análise no tempo e na frequência, o presente trabalho fez uso de um *hardware* mais sofisticado do que o apresentado por trabalho semelhante, o *datalogger* de Fisher e Gould [7] cujo *hardware* é um microcontrolador ATMEGA328P 8-bit, enquanto o apresentado no medidor de vibração consiste de um microcontrolador dsPIC 16-bit com arquitetura voltada ao processamento digital de sinais e, portanto, viável à implementação de análise de dados em trabalhos futuros.

TABLE II
Custo de uma unidade do Medidor de Vibração.

	Custo Aprox. (R$)
Componentes passivos	10,00
Circuitos integrados	45,00
Conexões e interface	40,00
PCI e fotolitos	120,00
Total	**215,00**

A plataforma adotada, constituída de um microcontrolador acessível e de baixo custo e cuja montagem custou cerca de R$215,00 devido à terceirização da confecção da PCI, conforme a tabela II, se mostrou adequada para o problema e está disponível em domínio público em sua versão estendida para futuros desenvolvedores da comunidade interessada no

tema, além de constituir uma opção de ponto de partida para implementação de projetos de vibração na própria instituição em que foi desenvolvido o protótipo.

REFERENCES

[1] S. S. Rao, *Mechanical Vibrations*, 5th ed. Prentice Hall, 2011.

[2] C. da Costa, M. H. Mathias, and M. Kashiwagi, "Development of an instrumentation system embedded on FPGA for real time measurement of mechanical vibrations in rotating machinery," in *Instrumentation & Measurement, Sensor Network and Automation (IMSNA), 2012 International Symposium on*, vol. 1. IEEE, 2012, pp. 60–64.

[3] G. Merendino, A. Pieracci, M. Lanzoni, and B. Ricco, "An embedded system for real time vibration analysis," in *Advances in Sensors and Interfaces (IWASI), 2011 4th IEEE International Workshop on*. IEEE, 2011, pp. 6–11.

[4] "Arduino project," Arduino, 2014. [Online]. Available: http://www.arduino.cc/

[5] C. Harnett, "Open source hardware for instrumentation and measurement," *IEEE Instrumentation and Measurement Magazine*, 2011.

[6] J. Freeman, "Bitbucket vs. github: Which project host has the most?" 2013. [Online]. Available: http://www.infoworld.com/d/application-development/bitbucket-vs-github-which-project-host-has-the-most-227061

[7] D. K. Fisher and P. J. Gould, "Open-source hardware is a low-cost alternative for scientific instrumentation and research," *Modern Instrumentation*, 2012.

[8] J. D. Smith, *Vibration Measurement Analysis*, 1989.

[9] N. S. Soeiro, "Fundamentos de vibrações e balanceamento de rotores," 2008.

[10] R. B. Randall, *Vibration-based Condition Monitoring*. Wiley, 2011.

[11] *Sistema Internacional de Unidades - SI*, Inmetro, 2012. [Online]. Available: http://www.inmetro.gov.br/

[12] *SDL 800 Vibration Meter Product Datasheet*, Extech Instruments Corporation, 2011. [Online]. Available: http://www.extech.com/

[13] *ADXL345 3-Axis Digital Accelerometer Datasheet*, Analog Devices, 2013. [Online]. Available: http://www.analog.com/

[14] *Microlog CMXA50 - Coletor/Analisador de dados*, Revisão b ed., SKF Condition Monitoring Inc., 2002.

[15] *Mechanical vibration of rotating and reciprocating machinery – Requirements for instruments for measuring vibration severity*, Iso 2954:1975 ed., ISO - International Organization for Standardization, 1975.

[16] "Eagle - easily applicable graphical layout editor," CadSoft Computer, 2013. [Online]. Available: http://www.cadsoftusa.com/

[17] *MPLAB X Integrated Development Environment (IDE)*, Microchip Technology Inc., 2014. [Online]. Available: http://www.microchip.com/mplabx