



PROJETO *OPEN SOURCE HARDWARE* PARA INSTRUMENTAÇÃO ELETRÔNICA COM APLICAÇÃO EM MEDIÇÃO DE VIBRAÇÃO EM MÁQUINAS INDUSTRIAIS

Rebeca Lima¹, Lucas Silva¹ e Eudemario Santana¹

¹Faculdade de Tecnologia SENAI CIMATEC

E-mails: rebeca.lima@fieb.org.br, lucas.cs@fieb.org.br,
eudemario.santana@fieb.org.br

RESUMO

Os projetos *Open Source Hardware* (OSH) são empregados quando se deseja ter construção colaborativa de algum componente ou equipamento, o que permite obter maior diversidade de opiniões (usuários e desenvolvedores), além de ter redução de custos, já que voluntários podem ser empregados para contribuir com o projeto. Neste artigo é tratado o desenvolvimento de placas de circuito impresso (PCI) para realizar medições de máquinas. A medição de vibrações constitui o ponto de partida, pois foi concebido e construído um protótipo para medição de vibrações e os resultados obtidos validaram a sua funcionalidade básica; a partir do protótipo concebido, é apresentado o projeto de expansão do conceito do dispositivo para a plataforma mais abrangente de medição de grandezas. 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.

1. INTRODUÇÃO

1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO

Um dispositivo elaborado sob a filosofia *Open Source Hardware* (OSH) tem seu projeto disponível publicamente para que qualquer indivíduo possa estudar, modificar, distribuir, construir e vender o projeto ou o dispositivo propriamente dito baseado no projeto OSH original [1]. Estas características descritas têm agrupado indivíduos e corporações para desenvolvimento colaborativo de componentes ou sistemas para uso industrial ou cotidiano. Uma iniciativa comercial de destaque é o processador do tipo SPARC (*scalable processor architecture*), cujo projeto OpenSPARC [2] foi liderado pela empresa Sun Microsystems. Em 2010 foi adquirido pela Oracle, para desenvolvimento de processadores RISC, que permitem realizar operações com número reduzido de instruções. Uma das iniciativas recentes de maior sucesso é o Arduino, projeto de uma placa eletrônica que possui, além de um microprocessador, um conjunto de periféricos com todos os circuitos de interfaces já projetados para uso. O Arduino ainda permite, além da modificação que é inerente aos projetos OSH, o acoplamento de outras placas, chamadas de *shield*, que adicionam novas funcionalidades, tornando-o flexível para usos diversos.



Estudos que mostram ser possível o uso do OSH como meio de desenvolvimento de produtos comerciais já existem, como o mostrado na referência [3]; neste identifica-se projetos bem sucedidos bem como as principais características da filosofia OSH.

O uso do OSH foi o ponto de partida do trabalho [4] para o desenvolvimento de um projeto para criar uma placa que possa ser utilizada como plataforma de desenvolvimento de instrumentação e tratamento de dados. Iniciou-se concebendo e construindo um protótipo para medir vibração em máquinas industriais e expandiu-se a ideia para um projeto (sem a construção do protótipo, mas com esquema elétrico, lista de materiais e layout de PCI elaborados) de um kit de instrumentação, que permite a estudantes ou empresas utilizarem os arquivos (disponibilizados em [5]) para criar equipamentos, comerciais ou de uso acadêmico, com finalidades específicas ou ainda mais genéricas para uso na engenharia de instrumentação. As duas últimas referências citadas são a base para o presente artigo, por isso todo o conteúdo será baseado no seu conteúdo.

1.2 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 [6]. 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 desempenho de um hardware dedicado e a flexibilidade dos substratos programáveis via software, previamente modelado e simulado em ambiente Simulink/MATLAB. Os resultados experimentais foram validados a partir dos dados teóricos calculados e apontados como satisfatórios para a modelagem e sistema propostos.

Outro trabalho [7] 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). Para os testes de bancada foram utilizados um motor de corrente contínua associado a um tacômetro ótico, rolamentos, engrenagens e outros elementos mecânicos onde puderam ser simuladas falhas de desbalanceamento de mancal e falhas em engrenagens. 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 OSH vem ganhando na comunidade em geral, particularmente desde 2006 com o lançamento do Arduino [8]. 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 [9].

1.3 OBJETIVO

Propôs-se, como objetivo geral deste trabalho, o desenvolvimento de dois projetos de *hardware* aberto, sendo um deles um protótipo que foi construído, validado e apresentado no artigo “Plataforma de Hardware e Código Abertos para Extração de Parâmetros de Vibração em Máquinas Industriais” aceito pelo IV Simpósio Brasileiro de Engenharia de Sistemas Computacionais (SBESC). Quanto aos objetivos específicos, o primeiro deles, foi a construção do citado protótipo, um medidor de vibração cujo projeto foi baseado em revisão bibliográfica e *benchmarking* apresentados na referência [4]. A pesquisa de *benchmarking* que auxiliou a seleção do elemento sensor para medição de aceleração e da faixa de frequência de 10 a 1000 Hz é apresentada de forma resumida na Tabela 1. O segundo objetivo específico consistiu de um projeto de kit para instrumentação e, por fim, também foram objetivos específicos que esses projetos tivessem baixo custo e cujas documentações fossem disponibilizadas gratuitamente para a comunidade de desenvolvedores interessada. Assim, foram propostas duas versões de sistemas embarcados: a primeira se tratando da aplicação voltada à medição de vibração e a segunda, proposta apenas em termos de projeto detalhado, voltada a futuras aplicações com outros sensores compatíveis com a tecnologia utilizada, e não necessariamente relacionados a medição de vibração, tais como temperatura, corrente, tensão ou mesmo sensoriamento para áudio, entre outras grandezas físicas importantes na análise de máquinas. Tais objetivos conduziram o trabalho a duas linhas de pesquisa transversais: uma no âmbito do desenvolvimento de *hardware* em plataforma e código abertos e outra na aplicação deste no âmbito da instrumentação e manutenção industrial.

Tabela 1. *Benchmarking* resumido de medidores de vibração.

| Fabricante | REED | Exttech | IMPAC | PCE | GENERAL |
|-------------------|---|---------------------------|--|--|------------------------------|
| Modelo | SD-8205 | VB400 | VT-8204 Lutron | PCE-VT 2800 | VB8201HA |
| Medição | Velocidade Aceleração | Velocidade Aceleração | Velocidade Aceleração Deslocamento | Velocidade Aceleração Deslocamento | Velocidade Aceleração |
| Frequência | 10 a 1000 Hz, ISO 2954 | 10 a 1000 Hz, ISO 2954 | 10 a 1000 Hz, ISO 2954 | 10 a 1000 Hz, ISO 2954 | 10 a 1000 Hz, ISO 2954 |
| Deslocamento | - | - | 1,999 mm | 1.999 mm | - |
| Velocidade | 0,5 ~ 199,9 mm/s | 200 mm/s | 0,5 ~ 199,9 mm/s | 0,5 ~ 199,9 mm/s | 200 mm/s |
| Aceleração | 0,5 ~ 199,9 m/s ² 0,05 ~ 20,39 g | 20,39 g | 0,5 ~ 199,9 m/s ² 0,05 ~ 20,39 g | 0,5 ~ 199,9 m/s ² 0,05 ~ 20,39 g | 200 mm/s ² |
| Precisão | ±(5% + 2d) | ±(5% + 2d) | ±(5% + 2d) | ± 5 % + 5 dgt | - |
| Logger | Sim, SD Card | - | Sim, 1000 pts | Sim, SD Card | - |
| Amostragem | 1 - 3600 s | - | 1 s | 1 s | - |
| Display | LCD, 4 dígitos c/ backlight | LCD, 4 dígitos | LCD, 5 dígitos | LCD, backlight | LCD, 4 dígitos |

| | | | | | |
|---------------|------------------------|-----|---------------------------|---------------------------|-----|
| Comunicação | RS232/USB sem software | - | RS232/USB requer software | RS232/USB requer software | - |
| Ajuste Offset | Sim | Sim | Não | Não | Não |

2. METODOLOGIA

2.1. REQUISITOS

Uma plataforma para investigação de fenômenos de vibração em máquinas oferece *hardware* básico (esta plataforma foi construída e validada experimentalmente) enquanto que uma segunda plataforma oferece hardware mais poderoso, permitindo ao usuário analisar fenômenos mais complexos e realizar comunicações com mais equipamentos digitais (esta plataforma foi projetada e a monografia [4] disponibiliza todas as informações para fabricação, montagem e uso). A segunda plataforma consiste de uma expansão da primeira e, portanto, herda as principais escolhas feitas. Essa condição reforça a importância do planejamento e especificação desde o início do projeto como um todo. Embora a definição dos principais materiais seja feito nesta etapa, apenas após a elaboração do esquemático é que a lista de materiais é finalizada tendo em vista o dimensionamento de alguns componentes e os ajustes que ocorrerem ao longo da atividade.

2.1.1 MEDIDOR DE VIBRAÇÃO

Conforme o passo inicial citado neste trabalho, foi estabelecido que o objetivo da plataforma básica seria realizar medições de vibração em máquinas rotativas através de um dispositivo portátil cuja interface com o usuário fosse composta por visor e teclado e que permitisse a gravação de dados em cartão de memória.

Portanto, começando pela escolha do sensor, sabe-se que os acelerômetros 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, 20,39 g [10]. Optou-se então pelo sensor de modelo ADXL345 do fabricante Analog Devices [11], um acelerômetro digital triaxial capaz de medir acelerações estáticas e dinâmicas de 16 g com resolução de até 13 bits e interface de comunicação SPI/I²C, 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 I²C para o sensor e SPI para o cartão de memória, e considerando também o plano de expansão da plataforma na segunda etapa, 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).



Quanto ao microcontrolador, escolheu-se o modelo dsPIC33FJ64GP706 por ser um *hardware* voltado ao processamento digital de sinais com capacidade de operação de até 40 MIPS, memórias RAM e de programa de 16 e 64 Kbytes, respectivamente, provido de portas UART, SPI, I²C, *timers* de 16 bits, módulos de captura, comparação, modulação por largura de pulso (*Pulse Width Modulation*, PWM), conversor analógico-digital (ADC), mais de 50 pinos de I/O, entre outras funcionalidades [12]. Foi, além disso, o modelo adequado disponível para aquisição imediata no mercado nacional. As funcionalidades propostas para a plataforma do medidor de vibração foram teclado com 3 botões tipo *push-button*; *display* LCD 16x2; *slot* para cartão de memória com conexão SPI; 2 conexões para comunicação I²C.

2.1.2 KIT DE INSTRUMENTAÇÃO

Enfatizando a natureza OSH e o objetivo de oferecer uma plataforma amigável para futuros desenvolvedores, nesta etapa a abordagem foi generalizar a plataforma original para aplicações diversas de instrumentação. Com o mesmo microprocessador, disponibilizou-se, portanto, o máximo de periféricos não utilizados anteriormente, mas apropriados para tal finalidade, com o mínimo de componentes a acrescentar em relação ao primeiro projeto e mantendo o baixo custo. As funcionalidades propostas foram: teclado com 4 botões tipo *push-button*; *display* LCD 16x2; *slot* para cartão de memória com conexão SPI; 4 conexões para ADC; 2 conexões para comunicação I²C; 2 conexões para PWM; 1 conexão para UART com padrão RS-232 opcional; 1 conexão para padrão CAN (*Controller Area Network*).

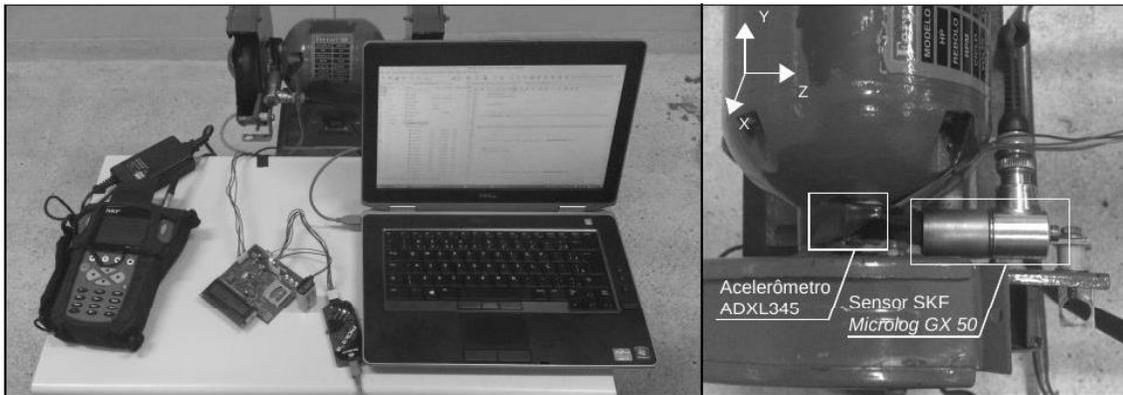
3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 MEDIDOR DE VIBRAÇÃO

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 em relação 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 1. 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 [13].

Figura 1. Conjunto utilizado no ensaio de vibração.

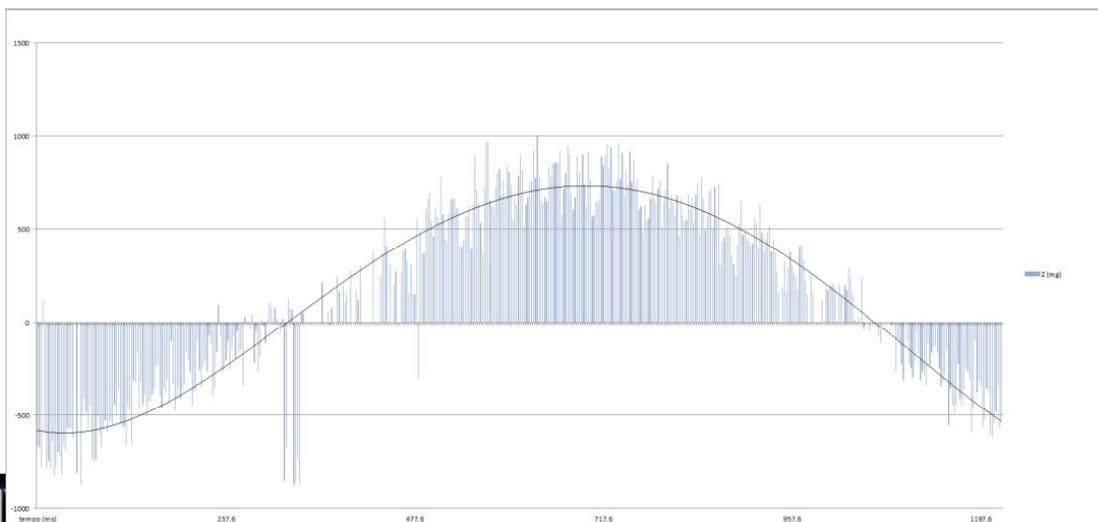


Neste conjunto, o desbalanceamento foi provocado pela inserção de duas pequenas massas (2 porcas) em apenas um dos lados do eixo do motor, causando uma vibração de baixa intensidade, porém notável em relação ao regime normal de operação. Os sensores de cada dispositivo foram fixados sobre o mesmo ponto da carcaça (i.e. sobre o mancal conforme sugestão da norma ISO 10816-3 [14]) do motor: o sensor do *Microlog* foi posicionado paralelamente ao chão, captando vibrações no sentido transversal ao eixo do motor como pode ser visto na Figura 1 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 o cálculo do valor RMS foi o parâmetro de comparação. 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, como citado acima, foi a raiz quadrática média dos valores (RMS).

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 eixos X e Y. Ao realizar a compensação de *offset* e calcular o valor RMS do intervalo obtido para a coordenada Z, obteve-se 584 mg, enquanto o *Microlog* registrara 538 mg.

Figura 2. Gráfico das vibrações em Z no motor desbalanceado.



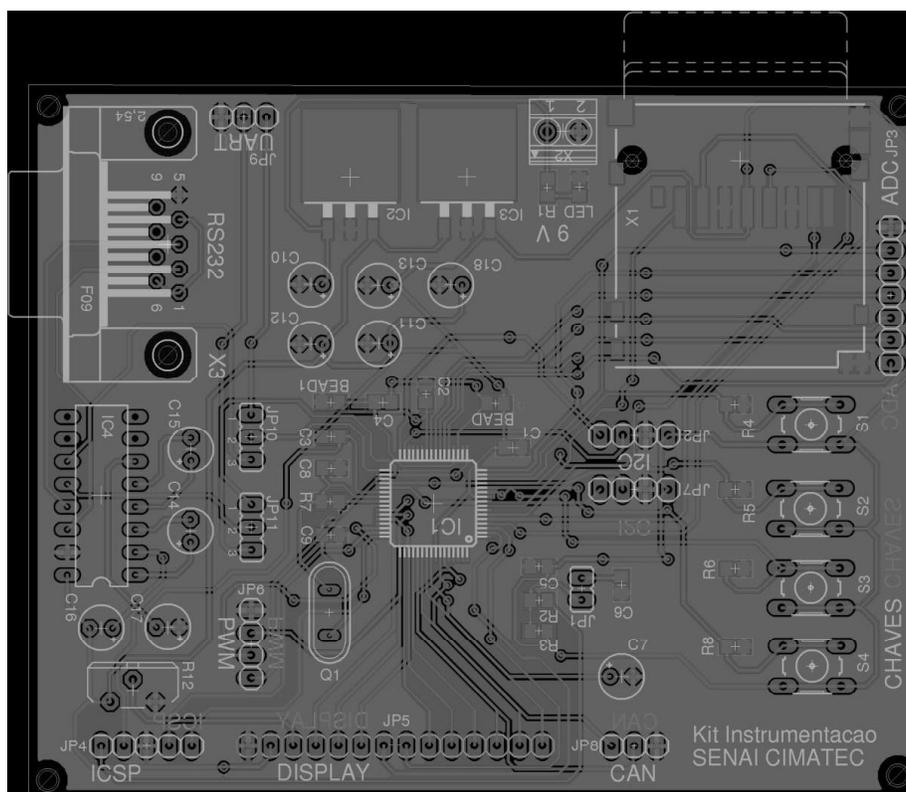
Esse resultado corresponde a uma diferença de aproximadamente 8,6% entre a medição do protótipo e a medição deste instrumento que foi tomado como referência e que é utilizado no laboratório de vibrações do SENAI CIMATEC. Mesmo não tendo sido possível mensurar o erro associado ao próprio *Microlog* o 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 10% do valor de referência [15].

Observando a curva obtida para o eixo Z na Figura 2, pode-se notar o envelope sugere uma curva oscilatória. Além disso, sabendo-se que o valor RMS de uma senóide pura corresponde a $V_{pico}/\sqrt{2}$, se, por inspeção visual deste envelope, tomarmos como valor de pico aproximadamente 750 mg, o valor RMS será de aproximadamente 530 mg, o que corresponde a uma diferença de 1,43 % em relação ao que foi registrado pelo *Microlog*.

3.2 KIT DE INSTRUMENTAÇÃO

O kit de instrumentação possui o núcleo de circuitos desenvolvidos e validados na seção 3.1, acrescidos dos pontos listados na seção 2.2.2. O resultado deste projeto é um esquemático e layout de placa de uso geral para instrumentação, cujos projetos estão ilustrados nas Figuras 3 e 4. A placa possui tamanho final 10 x 8 cm.

Figura 3. *Layout* do kit de instrumentação

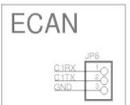
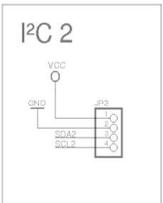
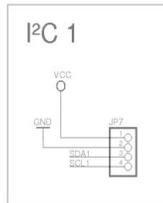
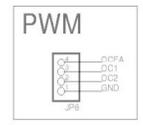
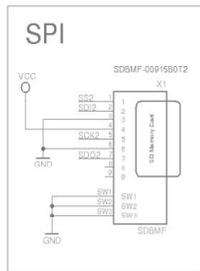
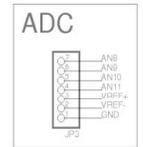
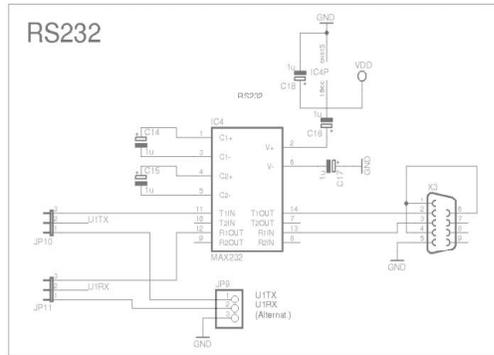
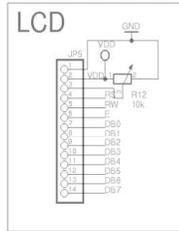
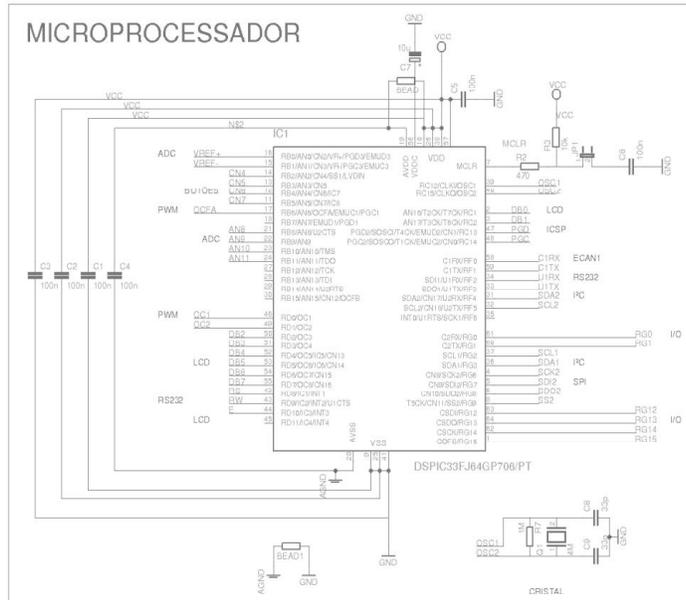
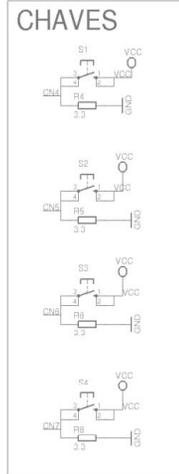
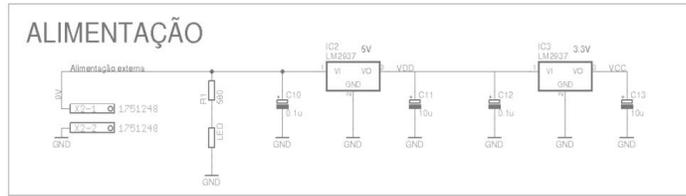
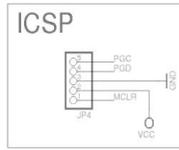




3.3 ARQUIVOS PARA COLABORAÇÃO NO PROJETO

A descrição dos resultados obtidos feitas neste artigo se constitui parte dos resultados obtidos no desenvolvimento de plataforma OSH para instrumentação. O resultado mais significativo é a disponibilidade dos arquivos para que qualquer indivíduo ou empresa possam fazer uso das concepções já elaboradas como ponto de partida para desenvolver novos equipamentos para o uso que desejaram. Os arquivos referentes à PCI do kit de instrumentação e o firmware desenvolvido para a aplicação de medição de vibração estão disponíveis no site [5] e os autores à disposição para quaisquer dúvidas.

Figura 4. Esquemático do kit de instrumentação.



4. CONCLUSÃO

Neste artigo foram apresentados um protótipo para realização de vibrações e um projeto para realização de instrumentação. Ambos os concebidos para que sejam OSH,



disponibilizados para que outros indivíduos possam modificar e adicionar funcionalidades.

O dispositivo contendo sistema embarcado *Open Source Hardware* capaz de realizar medições de vibração foi validado experimentalmente, conforme mostram os gráficos exibidos na seção 3.1 que apontam para o funcionamento esperado do protótipo, por meio da realização de testes dinâmicos, que apresentou medições próximas às de um instrumento comercial.

O projeto de um kit de instrumentação também foi discutido e, por utilizar componentes disponíveis comercialmente, além de topologias de circuito descritas nos livros básicos de projetos eletrônicos e *datasheets* de fabricantes de componentes, pode ser tratado como um projeto que pode ser empregado como base para aplicações comerciais ou acadêmicas.

A filosofia OSH foi empregada na disponibilização dos arquivos para visualização e modificação do projeto, além da documentação necessária para entendimento das funcionalidades dos circuitos projetados.

REFERÊNCIAS

- ¹Sítio Definition of Free Cultural Works. Disponível em: <<http://freedomdefined.org/Definition>>. Acesso em: 19 agosto 2014.
- ²Sítio da Oracle Corporation. Disponível em: <<http://www.oracle.com/technetwork/systems/opensparc/opensparc-overview-562924.html>>. Acesso em: 19 agosto 2014.
- ³Lock, J. Open Source Hardware – Can Embedded Electronics Companies Thrive Through the Use and/or Development of Open Source Hardware? *Chalmers University of Technology* **2013**, 5, 13.
- ⁴Lima, R. T. Plataforma de Hardware e Código Abertos para Extração de Parâmetros de Vibração em Máquinas Industriais. Faculdade de Tecnologia SENAI CIMATEC, 2014.
- ⁵Sítio GitHub do projeto. Disponível em: <<https://github.com/rebecatourinho/opencimatec>>.
- ⁶Costa, C. da; Mathias, M. H.; Kashiwagi, M. Development of an instrumentation system embedded on FPGA for real time measurement of mechanical vibrations in rotating machinery. *IEEE Instrumentation & Measurement, Sensor Network and Automation (IMSNA)* **2012**, 60-64.
- ⁷Merendino, G. et al. An embedded system for real time vibration analysis. *IEEE Advances in Sensors and Interfaces (IWASI)* **2011**, 6-11.
- ⁸Sítio Arduino Project. Disponível em: <<http://www.arduino.cc/>>. Acesso em: 13 março 2014.
- ⁹Harnett, C. Open Source Hardware for Instrumentation and Measurement. *IEEE Instrumentation and Measurement Magazine* **2012**, 34-38.



¹⁰SDL 800 Vibration Meter Product Datasheet. Extech Instruments Corporation, **2011**.

¹¹ADXL345 3-Axis Digital Accelerometer Datasheet. Analog Devices, **2013**.

¹²dsPIC33FJXXXGPX06/X08/X10 Family Datasheet. Microchip Technology Inc., **2009**.

¹³Manual Microlog CMXA50 - Coletor/Analisador de dados. SKF Condition Monitoring Inc., **2011**.

¹⁴ISO10816-3 - Mechanical vibration — Evaluation of machine vibration by measurements on non-rotating parts. ISO - International Organization for Standardization. **1998**.

¹⁵ISO2954 - Mechanical vibration of rotating and reciprocating machinery - Requirements for instruments for measuring vibration severity. ISO - International Organization for Standardization. **1975**.