

INTERFACE DIDÁTICA PARA ANÁLISE DE VIBRAÇÕES MECÂNICAS

João Marcelo Cardoso Carvalho¹ & Claudia Márcia Ribeiro Machado Albernaz¹

RESUMO

CARVALHO, J. M. C.; ALBERNAZ, C. M. R. M. Desenvolvimento de uma Interface de Baixo Custo para Análise de Vibrações Mecânicas. **Perspectivas Online: Exatas & Engenharias**, v. 9, n. 26, p. 23-35, 2019.

A análise de vibrações mecânica é uma técnica de manutenção preditiva que consiste na medição dos níveis oscilação de uma determinada estrutura para que dessa forma seja possível inferir a existência de problemas e falhas relacionados com os componentes que a compõem. Neste artigo serão tratados o desenvolvimento e a validação de um sistema experimental e de baixo custo para análise de vibrações mecânicas. Os principais objetivos são descrever o funcionamento do código elaborado para a aquisição dos dados e verificar se a aplicação apresenta uma resposta em frequência satisfatória do sinal analisado.

Para realizar a confirmação do funcionamento do sistema, um sensor do tipo acelerômetro foi montado sobre um aparato composto por um gerador de sinais, um amplificador de som e um auto-falante, por meio do qual a frequência da força excitatória era controlada. Os dados de aceleração foram enviados para uma placa Arduino e, em seguida, para o computador, que possui um programa desenvolvido para tratamento do sinal elétrico e plotagem de gráficos de resposta de frequência e vibração. Como resultado, foi possível obter uma leitura satisfatória, significativamente próxima da frequência do sinal gerado.

Palavras-chave: Vibrações; Arduino; MatLab.

ABSTRACT

Mechanical vibration analysis is a predictive maintenance technique that consists in measuring the oscillation levels of a given structure so that it is possible to infer the existence of problems and failures related to its components. In this article, the development and validation of an experimental and low cost system for the analysis of mechanical vibrations will be discussed. The main goals are to describe the operation of the code developed for data acquisition and to verify if the application presents a satisfactory frequency response of the analyzed signal.

In order to confirm the operation of the system, an accelerometer-type sensor was mounted on an apparatus composed of a signal generator, a sound amplifier and a loudspeaker, where the frequency of the excitatory force was controlled. The acceleration data was sent to an Arduino board and then to the computer, where the developed program handled and transformed it into the shape of frequency and vibration response graphs. As a result, it was possible to obtain a satisfactory reading that was very close to the frequency of the signal generated.

Keywords: Vibrations; Arduino; MatLab.

¹Institutos Superiores de Ensino do CENSA – ISECENSA – Laboratório de Análise e Projeto de Sistemas Mecânicos – LAPSIM – Rua Salvador Correa, 139, Centro, Campos dos Goytacazes, RJ, CEP: 28035-310, Brasil;

(*) e-mail: cmrmachado@gmail.com

Data de chegada: 17/09/2019 Aceito para publicação: 13/11/2019

1. INTRODUÇÃO

A análise de vibrações mecânicas é uma técnica não-intrusiva de manutenção preventiva, que permite, através da medição dos níveis de vibração de um determinado equipamento, inferir a existência de uma série de problemas logo em seus estágios iniciais de desenvolvimento, tais como rolamentos defeituosos, rotores desbalanceados, folgas mecânicas, engrenagens quebradas ou alinhamento incorreto. Tal procedimento pode evitar gastos desnecessários com a manutenção de máquinas defeituosas e garantir que a linha de produção não seja afetada (MOHANTY, 2018).

Basicamente a medição de vibração em um determinado equipamento industrial consiste em transformar o movimento de sua estrutura em um sinal elétrico, através de um algum tipo de sensor, como transdutores e acelerômetros. Como esse sinal de saída possui, em geral, uma amplitude muito baixa, é necessário então que ele seja amplificado para assim obter uma leitura apropriada. O sinal adquirido é então tratado e processado para ser exibido na forma de gráficos e tabelas (RAO, 2016).

O processamento de sinais em si consiste em determinar a resposta que um sistema apresenta quando está sob a ação de uma força excitatória. Essa resposta se apresenta no domínio do tempo, o que não fornece uma quantidade significativa de informação útil para estudos de análise de vibrações, ou no domínio da frequência, o qual é preferível porque mostra uma ou mais frequências discretas que compõem o sinal elétrico coletado. Como a maioria das análises de vibrações mecânicas se dão em tempo real, então é necessário que o tempo entre a coleta do sinal e a plotagem de um gráfico não seja muito grande. Para tanto, existem técnicas como a Transformada Rápida de Fourier (FFT), que foram desenvolvidas justamente para evitar esse tipo de problema (CARVALHO; VELOSO, 2015).

Os acelerômetros são os dispositivos responsáveis por medir os níveis de vibração na estrutura do equipamento. São constituídos basicamente por uma estrutura fixa e uma massa suspensa. Quando sob a ação de uma força externa, a inércia permite que a massa resista ao movimento e, dependendo do tipo de acelerômetro, a resposta se apresenta como uma medida feita por meios resistivo, capacitivo ou piezoelétrico (STEVAN; SILVA, 2015).

Na prática, é uma técnica de medição extremamente eficiente, porém muito cara. Os dispositivos mais comumente utilizados nas indústrias para realizar as análises chegam a custar até milhares de dólares (GONZÁLES, 2014). Portanto, pode-se imaginar que muitas instituições de ensino superior não teriam todo o aparato para poder proporcionar ao aluno um primeiro contato com os procedimentos de medição de análise de vibrações mecânicas.

Existem, todavia, maneiras de se contornar essa situação. Uma delas seria o emprego de placas de desenvolvimento de baixo custo conhecidas como Arduino. Esses dispositivos são dotados de um circuito integrado chamado de microcontrolador, o qual, através de linhas de código, é capaz de ler os sinais elétricos emitidos pelos sensores de vibração acoplados aos equipamentos mecânicos, executar operações matemáticas sobre esses valores, armazená-los em uma memória interna integrada e enviá-los a um computador através da porta USB. Esses sinais podem então ser tratados e manipulados em um software de computação científica, de maneira que seja possível retirar informações importantes sobre o comportamento mecânico da máquina (MCROBERTS, 2015).

Dentre os softwares mais comuns e mais acessíveis para a realização desse tipo de

trabalho está o MATLAB, uma poderosa linguagem de programação científica capaz de ajudar em problemas de análise de sinais e modelagem matemática, por exemplo. É amplamente utilizado em universidades e departamentos de pesquisa e desenvolvimento das indústrias. O software principal é acompanhado por uma série de ferramentas (toolboxes) que foram desenvolvidas para auxiliar a execução de diversas tarefas como processamento de sinais, sistemas de controle e lógica fuzzy (MOORE, 2017).

A proposta desse artigo é, portanto, demonstrar o desenvolvimento de uma interface de análise de vibrações mecânicas dessa natureza e sua validação ao ser acoplada a um aparato gerador de forças excitatórias.

2. METODOLOGIA

O desenvolvimento da interface analisadora de vibrações mecânicas foi realizado em três etapas principais. Na primeira foram definidos qual placa e sensor seriam utilizados, o código do Arduino e os primeiros testes de leitura com o acelerômetro. Já na segunda etapa foi desenvolvido, em código MATLAB, a interface gráfica de usuário (GUI) e a estrutura física que iria alocar a placa de aquisição e o sensor. Por fim, foram realizados testes controlados por meio de gerador de sinais senoidais, para que o algoritmo de aquisição e tratamento do sinal elétrico de aceleração do sensor fosse validado.

A escolha da placa Arduino correta está associada a diversos fatores, como a quantidade de sensores que serão conectados à placa, a corrente que esses dispositivos consomem, a quantidade de memória disponível para armazenar o código, os protocolos de comunicação disponíveis e a velocidade de transmissão e recepção de dados (SILVA et al., 2014). Na Tabela 1 são listados os principais tipos de placas Arduino disponíveis no mercado junto de algumas informações importantes.

Tabela 1: Comparativo entre os principais modelos de placas *Arduino*. Fonte: Adaptado de Stefan e Silva (2015).

| Placa | <i>Arduino Uno</i> | <i>Arduino Mega 2560</i> | <i>Arduino Nano</i> |
|----------------------------|--------------------|--------------------------|--------------------------|
| Microcontrolador | ATmega 328 | ATmega 2560 | ATmega 168 ou ATmega 328 |
| Portas Digitais | 14 | 54 | 14 |
| Portas Analógicas | 6 | 16 | 8 |
| Memória | 32 K | 256 K | 16 K ou 32 K |
| <i>Clock</i> | | 16 MHz | |
| Corrente Máxima nas portas | | 40 mA | |
| Tensão de Operação | | 5 V | |
| Tensão de Alimentação | | 7 – 12 V _{DC} | |
| Preço Médio | R\$45,99 | R\$99,90 | R\$39,90 |

Para este projeto, a placa selecionada foi a *Arduino Uno*, pois esta apresenta a melhor relação custo-benefício. Com a placa selecionada, o passo seguinte foi a escolha do sensor para a captura dos valores de aceleração. O sensor selecionado foi o MMA7455, fabricado pela NXP. Este dispositivo trabalha com baixo consumo de energia e se comunica com a placa de aquisição através de saídas digitais I²C (*inter-integrated circuit*). Possui uma sensibilidade de até 8 g's de aceleração, o que o torna apropriado para a aplicação no projeto. O acelerômetro já vem de fábrica com um circuito regulador de tensão de alimentação e filtros capacitivos que ajudam a melhorar a qualidade do sinal (FREESCALE, 2009).

Em placas *Arduino Uno*, a conexão I²C é feita conectando-se a saída de *clock* (SCL) do sensor na porta analógica 5 (A5) e a saída de dados (SDA) na porta analógica 4 (A4). A alimentação do dispositivo é feita utilizando a saída de 3.3V e o aterramento no GND. O esquema de ligações entre o sensor e a placa é mostrado na Figura 1.

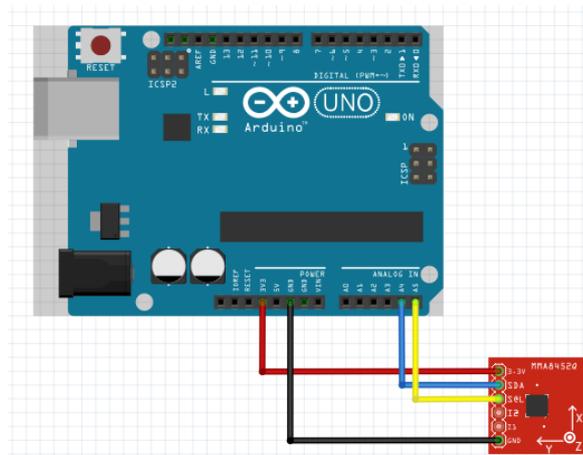


Figura 1 - Esquema de ligações entre a placa e o sensor.

No computador, utilizou-se a ferramenta App Designer do MatLab para a construção da interface gráfica do analisador de vibrações. Nele é possível inserir e posicionar os elementos visuais do programa de maneira fácil e prática. Dentro de cada um desses elementos é possível atribuir uma função relacionada à um determinado evento, ou seja, ao se clicar em um botão (o evento), um sinal será enviado para a placa requisitando que o sensor pare de enviar informações, por exemplo. Esse tipo de função também é denominado *callback* (DOWNEY, 2011).

Na Figura 2 é exibida a interface gráfica da aplicação. Nela, é possível observar que foram inseridos gráficos para representar a resposta do sistema no domínio da frequência e no domínio do tempo. O botão de Conectar abre a conexão serial na porta escolhida no botão logo acima. O botão Zerar fecha qualquer conexão existente e finaliza o ensaio. O botão de Iniciar envia um sinal para a placa e pede para que as leituras de aceleração sejam enviadas para o computador.

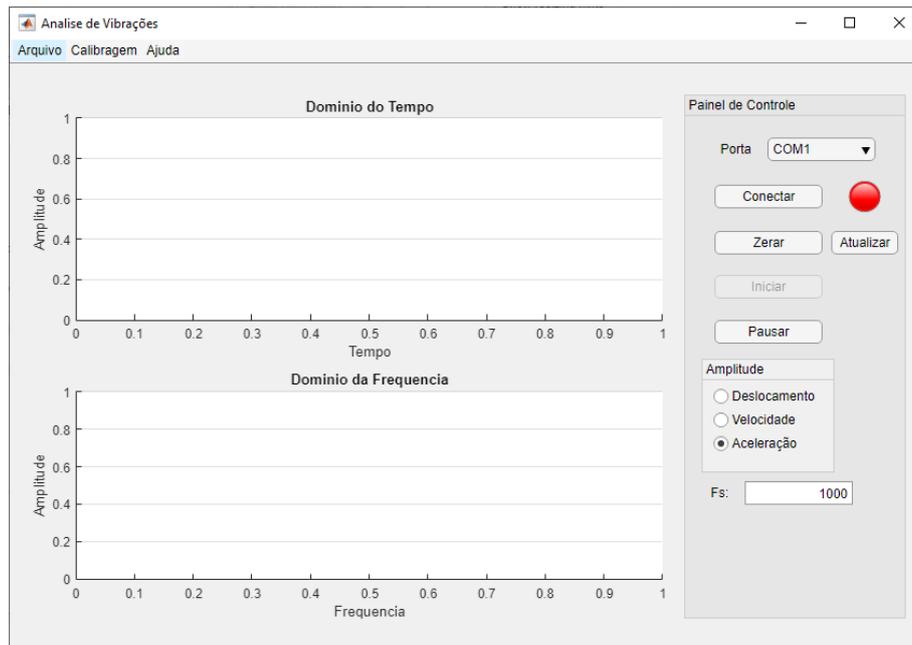


Figura 2: Interface Gráfica de Usuário (GUI).

O procedimento de plotagem do sinal de aceleração nos gráficos acontece em tempo real. Ou seja, à medida que os valores chegam ao computador, eles são tratados, convertidos para aceleração em m/s^2 e então são armazenados em um vetor de tamanho fixo definido pela frequência de amostragem do sinal (F_s), que é dado em hertz. Esta informação é então plotada diretamente no gráfico superior, mas a plotagem dos valores no domínio na frequência depende de um tratamento adicional.

O vetor que armazena o sinal de entrada recolhido é submetido ao algoritmo de Cooley e Tukey (MOORE, 2017) para o cálculo de transformadas de Fourier complexas. A resposta é obtida em termos de frequência do sinal. Esses valores são então plotados no gráfico da parte inferior do programa.

A fim de verificar o funcionamento do código, foi montado um aparato para confirmar se as informações exibidas pela interface eram verdadeiras. Esse sistema de validação consistia em acoplar o sensor a uma superfície na qual a frequência da força excitatória pudesse ser controlada. Para isso, foi utilizado um alto-falante pequeno de 6,5", um amplificador de som de 15W RMS de potência da marca Meteoro e um gerador de sinais MFG-4202 da marca Minipa. A frequência e a amplitude do sinal gerado foram controlados e, dessa forma, os valores mostrados nos gráficos puderam ser comparados com um parâmetro real. Na Figura 3 é ilustrada a estrutura do sistema de validação. O procedimento para verificar o funcionamento do sistema consistiu em submetê-lo a um sinal com valores de frequências de 15, 30, 45 e 60 Hz. A frequência de amostragem escolhida para o procedimento foi de 250 Hz.



Figura 3: Sistema de validação. Fonte: Autor.

3. RESULTADOS

Na Figura 4 é exibido o ensaio para um sinal senoidal de 15 Hz. Nela é possível perceber picos nas frequências de 15, 45 e 75 Hz.

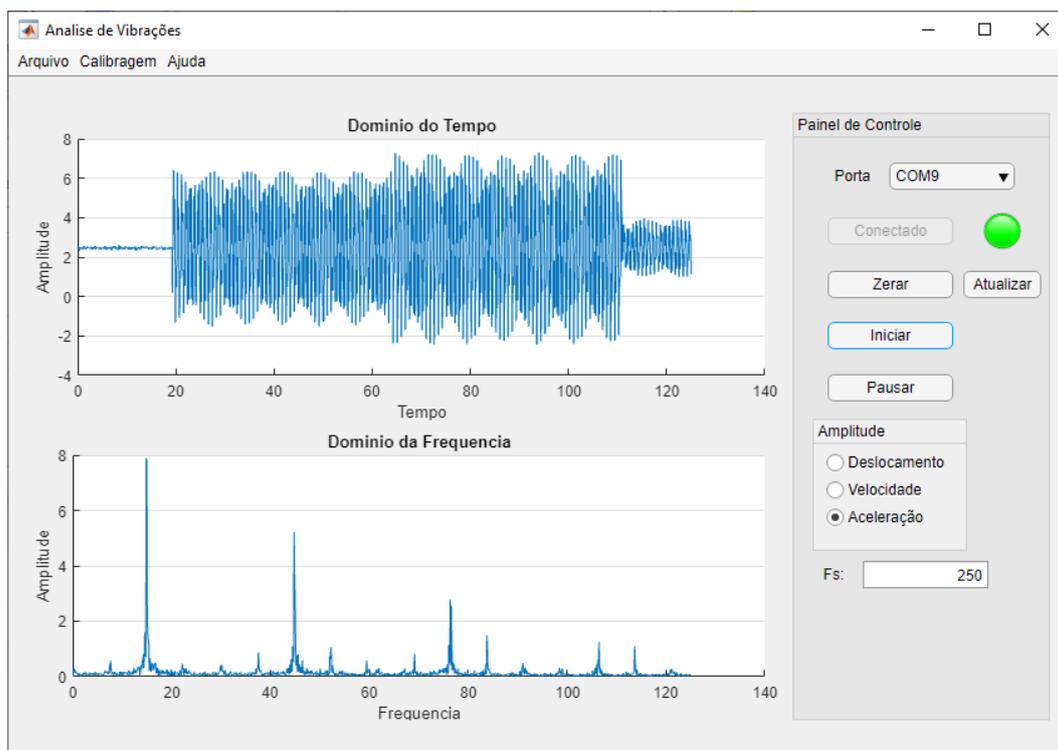


Figura 4: Ensaio com frequência do sinal igual a 15 Hz.

No segundo ensaio, o qual é exibido na Figura 5, a frequência do sinal aplicado foi de 30 Hz. Como resultado, foi obtido um pico principal em com um valor de frequência próximo de 30 Hz e um segundo e terceiro, mais atenuados, em cerca de 90 e 100 Hz.

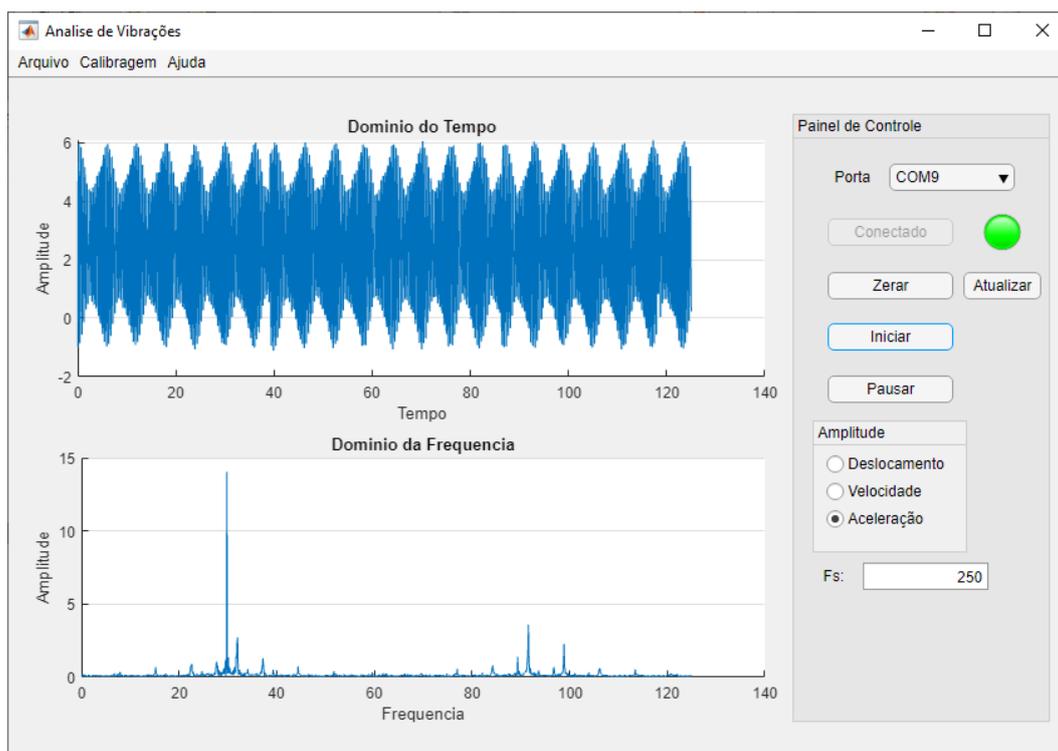


Figura 5: Ensaio com frequência do sinal igual a 30 Hz.

No terceiro ensaio, conforme pode ser visto na Figura 6, a frequência do sinal foi de 45 Hz. Como resultado, foi obtido um pico de frequência em 45 Hz e um segundo, com um valor de amplitude significativamente próximo da frequência dominante, em 75 Hz.

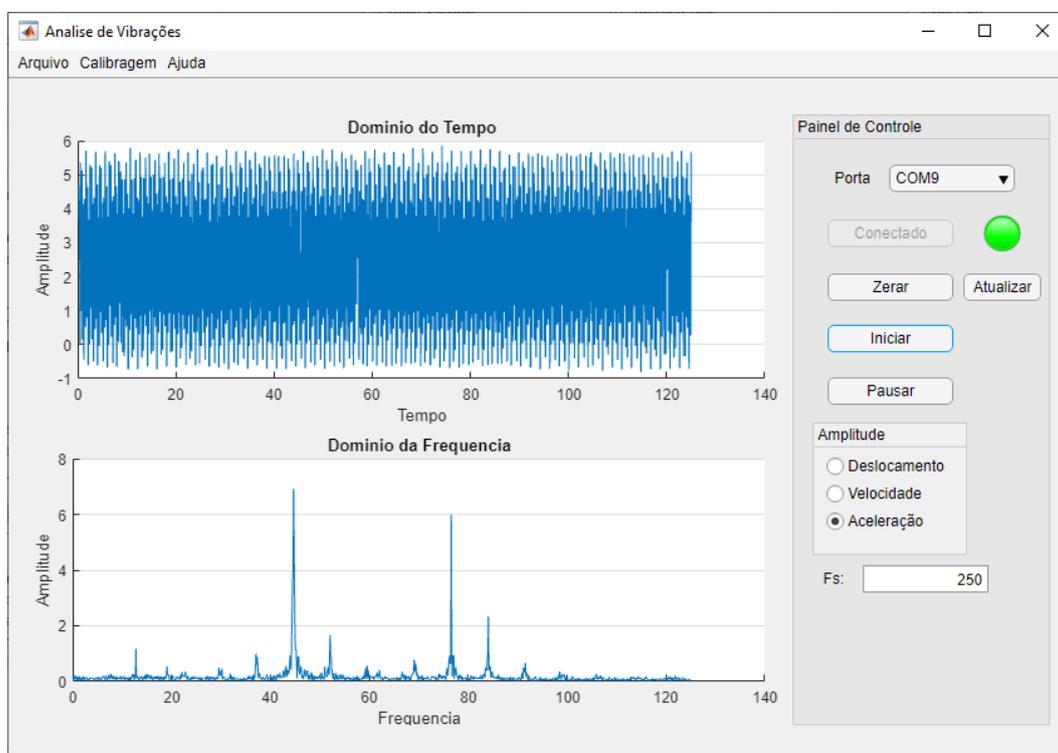


Figura 6: Ensaio com frequência do sinal igual a 45 Hz.

No último ensaio, conforme pode ser visto na Figura 7, a frequência do sinal aplicado foi de 60 Hz. Nesse caso foi obtido um padrão senoidal no gráfico Amplitude x Tempo significativamente diferente dos outros. Também é possível observar que os picos de frequência nesse ensaio estão bem mais próximos um dos outros. A frequência dominante tem um valor de 60 Hz, porém observa-se um segundo pico, com amplitude bem próxima do anterior, com um valor de cerca de 65 Hz.

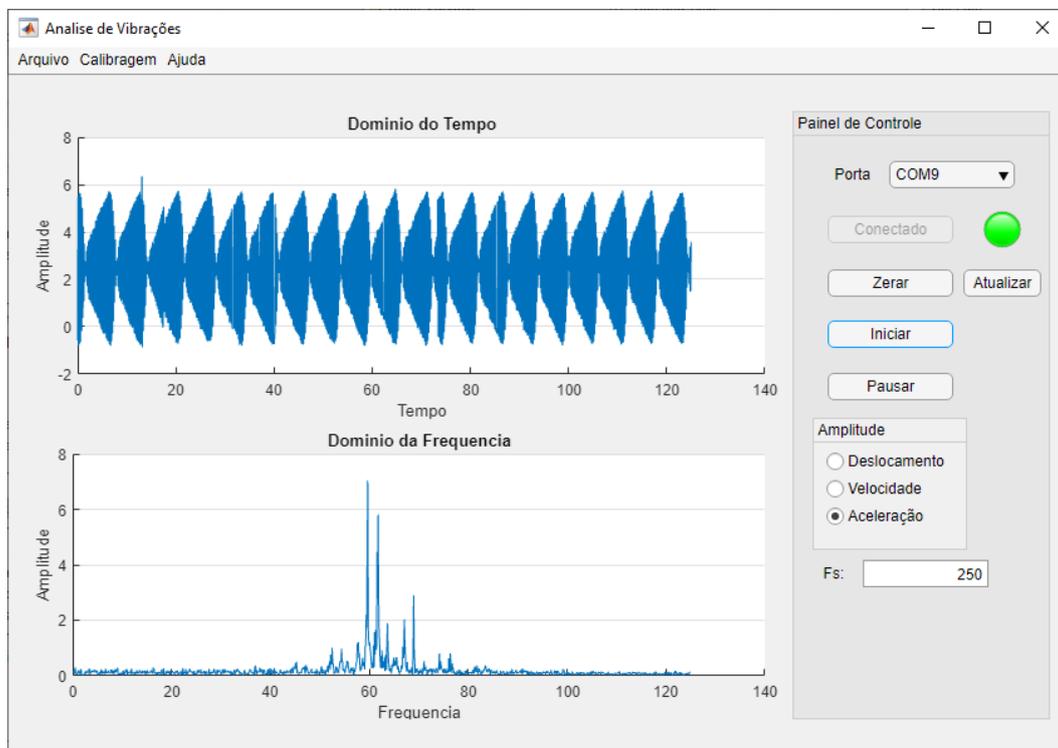


Figura 7: Ensaio com frequência do sinal igual a 60 Hz.

Por fim, em todos os ensaios foi possível observar que valores muito altos de amplitude eram enviados pelo sensor. Essa anomalia causava momentaneamente erros na plotagem do gráfico Amplitude x Frequência. Um exemplo desse tipo de problema é mostrado na Figura 8.

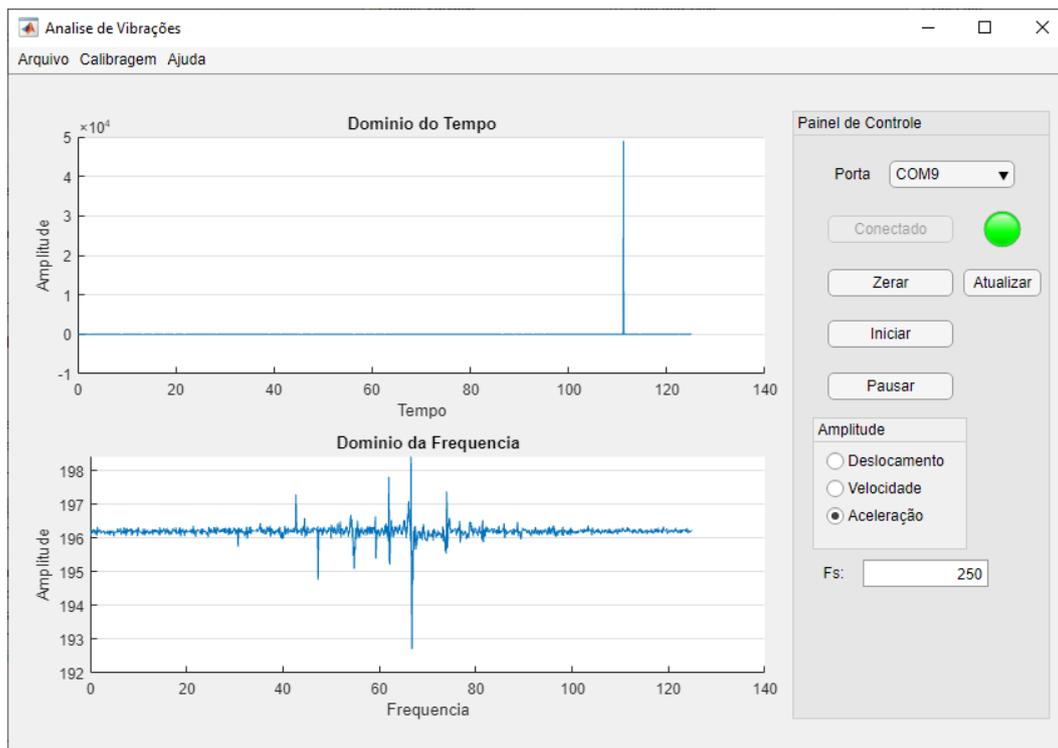


Figura 8: Anomalias durante a leitura de um sinal com frequência igual a 55 Hz.

4. DISCUSSÃO

No primeiro ensaio observou-se que os valores de frequência obtidos não correspondem aos que foram regulados no gerador de sinais. Em uma observação mais atenta, no entanto, é possível verificar que esses valores são de cerca de 4 vezes o esperado. Logo, é possível que esses valores sejam na verdade harmônicos do sinal principal, neste caso, o terceiro harmônico.

Além disso, o teorema da amostragem afirma que a frequência de amostragem deve ser pelo menos 2 vezes a frequência do sinal analisado. Aplicando frequências de amostragem múltiplas desse valor inicial, chamado também de taxa de Nyquist, é possível observar, dentro do espectro de frequência, os harmônicos que compõem o sinal (CARVALHO; VELOSO, 2015).

De acordo com o fabricante do sensor, Freescale (2009), a frequência máxima na qual este trabalha é de 125 Hz. Aplicando o teorema da amostragem, obtêm-se o valor de 250 Hz como taxa de Nyquist. Dessa forma, a frequência de amostragem utilizada no primeiro ensaio é um múltiplo de 250 Hz.

No segundo ensaio, o valor de 50 Hz é mostrado como resposta de frequência do sinal ao se utilizar uma taxa de amostragem de 250 Hz. Todavia é possível verificar uma frequência de cerca de 65 Hz como uma resposta do sinal. Uma hipótese seria que esse valor existe como resultado da montagem do sensor no sistema. Para verificar isso seriam necessárias algumas modificações ou o uso de um excitador de vibração apropriado, como o que foi utilizado por Gonzáles (2014) em seu trabalho.

No terceiro ensaio, aumentando um pouco a frequência da força excitatória para 60 Hz, observa-se que o resultado do ensaio anterior se repete. A resposta do sistema correspondente ao que foi configurado no gerador de sinais e a frequência anômala de 65 Hz permanece, o que reforça a ideia de que a montagem do sistema pode estar causando essa situação.

Os erros observados em algumas leituras também foram registrados nos trabalhos de Silva et al. (2014), de Varanis et al. (2016) e de Rocha, Maranghello e Lucchese (2013). Isso acontece por uma série de motivos como conexões elétricas frouxas, condutores elétricos inapropriados, rede elétrica mal aterrada, e outros.

Observando trabalhos anteriores acerca de interfaces semelhantes, ou até mesmo sobre ensaios de vibração, como no caso de Nilson e Carvalho (2019), o resultado obtido pode ser considerado satisfatório. A principal resposta no domínio da frequência, apresentada pela aplicação, é a própria frequência do sinal analisado.

Contudo algumas modificações são necessárias para que o sistema possa prover um resultado ainda melhor. O uso de condutores elétricos e conectores apropriados para sensores ajudariam a evitar erros de leitura como o que foi observado na figura 7. Por outro lado, uma montagem mais apropriada, que garantisse um contato direto do sensor com a superfície vibratória, permitiria que o problema mostrado nas figuras 4, 5, 6 fosse mitigado. Além disso, outros fatores como os próprios componentes eletrônicos do computador, a estrutura da bancada na qual o experimento foi realizado e a forma que o alto-falante foi posicionado sobre ela podem também ter influenciado os processos de aquisição do sinal.

5. CONCLUSÃO

Com os resultados obtidos, fica demonstrado que o sistema cumpre com seu objetivo principal. Ele consegue mostrar a frequência dominante do sinal o qual ele é sendo submetido de forma clara. Dessa forma, o conjunto placa de aquisição de dados e acelerômetro está adequado para aplicações didáticas no estudo de vibrações.

Todavia, os resultados obtidos podem ser melhorados se forem utilizados condutores elétricos específicos para equipamentos de instrumentação e o uso de bancadas mais rígidas para a validação do sistema. Isso garantiria uma menor perda de sinal de entrada durante o procedimento de aquisição do sinal de aceleração e tornaria a informação de saída do conjunto mais confiável.

Outra melhoria que pode ser realizada seria a utilização de outros métodos de fixação da base onde o sensor está acoplado. Uma estrutura mais rígida tornaria a leitura do sensor mais precisa e conseqüentemente um sinal mais limpo poderia ser analisado.

Além disso, também é possível a utilização de outros sensores de baixo custo com um limite de frequência de amostragem e maior capacidade de conversão de valores analógicos. Isso reduziria significativamente os erros de leitura observados em valores próximos a frequência natural da estrutura.

Com as modificações realizadas, a interface, junto com uma bancada didática de

vibrações mecânicas, poderia ser utilizada para estudos futuros do comportamento de máquinas rotativas e estruturas metálicas quando sob a ação de uma força excitatória.

6. REFERÊNCIAS

CARVALHO, J. M.; VELOSO, L. R. **Introdução à análise de sinais e sistemas**. 1a ed. São Paulo: Campus, 2015.

CARVALHO, D. **Desenvolvimento de um sistema de baixo custo para detecção precoce de desgaste em rolamentos de motores de indução trifásicos usando análise de vibrações**. 150p. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2019.

DOWNEY, A. B. **Physical Modeling in MATLAB**. 1. ed. Needham, MA: Green Tea Press, 2011.

FREESCALE. **Digital Output Accelerometer MMA7455L**. 2009.

GONZÁLES, R. C. D. **Desenvolvimento de um protótipo analisador de vibração de baixo custo para uso em manutenção preditiva**. Florianópolis, SC: [s.n], 2014.

MOORE, H. **MATLAB for Engineers**. Pearson, 2017.

MCROBERTS, M. **Arduino Básico**. 2a ed. São Paulo: Novatec, 2015.

MOHANTY, A. R. **Machinery condition monitoring: Principles and practices**. 1a ed. Boca Raton, FL: CRC Press, 2018.

NILSON, O. A., VALBERBO, L. R. **Bancada Acadêmica para Análise de Vibração Mecânica**. 2016. 15p. Projeto de Fim de Curso (Graduação) - Centro Universitário Salesiano São Paulo, São Paulo, 2016.

RAO, S. S. **Mechanical Vibrations**. 6a ed. Upper Saddle River, NJ: Pearson Education, 2016.

ROCHA, F. S. DA; MARANGHELLO, G. F.; LUCCHESI, M. M. Acelerômetro eletrônico e a placa Arduino para ensino de física em tempo real. **Caderno Brasileiro de Ensino de Física**, v. 31, n. 1, p. 98–124, 2013. DOI: 10.5007/2175-7941.2014v31n1p98.

SILVA, B. T. V. DA. **Bancada Para Análise De Vibração: Análise de falhas em máquinas rotativas**. Taubaté, SP: [s.n], 2012.

SILVA, M. A. da, CARVALHO, A. B., GARRIDO, J. C., ESTREMOTE, M. A. Sistema para monitoramento de vibrações utilizando Arduino. **Revista Interatividade**, v. 2, n. 2, p. 142-153, 2014.

STEVAN, S. L.; SILVA, R. A. **Automação e instrumentação industrial com Arduino: teoria e projetos**. 1ª ed. São Paulo: Saraiva Educação, 2015.

VARANIS, M.; SILVA, A. L., BRUNETTO, P. H. A., GREGOLIN, R. F. Instrumentation

for mechanical vibrations analysis in the time domain and frequency domain using the Arduino platform. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 38, n. 1, 2016. DOI: .1590/S1806-11173812063.