

SINAIS VIBRACIONAIS DE PÊNDULO COM ARDUINO: análise com transformada rápida de Fourier

ARDUINO PENDULUM VIBRATION SIGNS: fast Fourier transform analysis

Emilio David¹ - IFES
Markcilei Lima Dan² - IFES
Edmundo Rodrigues Junior³ - IFES

RESUMO

Apresenta-se um sistema de baixo custo para coleta de sinais de vibrações de um pêndulo simples. A coleta dos dados foi realizada com o auxílio de um Arduino, um osciloscópio e um acelerômetro. Utilizou-se a Transformada Rápida de Fourier (FFT) para comparar a frequência do pêndulo obtida experimentalmente com o valor teórico esperado. Verificou-se a acurácia do aparato proposto no que se refere à medida e observação dos parâmetros mais relevantes no movimento oscilatório do pêndulo como aceleração, período, frequência amplitude e velocidade. O experimento de baixo custo proposto possibilita a construção de sequência didática para o ensino dos conceitos de mecânica clássica.

PALAVRAS-CHAVE: Vibrações; Pêndulo; Sequência didática

ABSTRACT

We present a low-cost system for collecting vibration signals from a simple pendulum. Data collection was performed with the aid of an arduino, an oscilloscope and an accelerometer. The Fast Fourier Transform (FFT) was used to compare the pendulum frequency obtained experimentally with the expected theoretical value. The accuracy of the proposed apparatus was verified regarding the measurement and observation of the most relevant parameters in the oscillatory movement of the pendulum, such as acceleration, period, frequency, amplitude, and velocity. The proposed low-cost experiment enables the construction of a didactic sequence for teaching classical mechanics concepts.

KEYWORDS: Vibrations; Pendulum; Didatic sequence

DOI: 10.21920/recei72022826574586
<http://dx.doi.org/10.21920/recei72022826574586>

¹Graduando em Engenharia Mecânica no Instituto Federal do Espírito Santo - IFES, Campus Cachoeiro de Itapemirim. E-mail: emiliodavid1996@outlook.com / ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0368-8798>.

²Doutor em Engenharia Civil. Professor no Instituto Federal do Espírito Santo - IFES, Campus Cachoeiro de Itapemirim. E-mail: dan@ifes.edu.br / ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2733-3473>.

³Doutor em Ciências Naturais. Professor no Instituto Federal do Espírito Santo - IFES. E-mail: edmundo.cruzeiro@gmail.com / ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2733-3473>.

INTRODUÇÃO

Vibração

Na antiguidade, o interesse pela vibração surgiu pela descoberta dos primeiros instrumentos musicais. Desde então, o homem desenvolveu estudos práticos e analíticos sobre a teoria por trás do fenômeno da vibração. Percebe-se que a vibração é bastante comum no cotidiano das pessoas. Atividades como andar e falar envolvem o movimento oscilatório das pernas e dos tímpanos, respectivamente (RAO, 2008).

A vibração mecânica ocorre quando uma partícula realiza movimento entorno de uma posição estável, de equilíbrio. Fisicamente, esse fenômeno acontece da troca energética entre dois “depósitos” de um mesmo sistema (NEPOMUCENO, 1989). Dessa forma, a vibração de um sistema surge quando ocorre essa transferência alternada de energia cinética em energia potencial e vice-versa (RAO, 2008). A teoria de vibrações estuda os movimentos de oscilação de corpos, cujas variáveis envolvidas neste processo são: forças, deslocamentos, velocidade e aceleração (AMBROZIO, 2018).

Na engenharia, a análise de vibrações é de suma importância. É visível sua utilidade nos projetos de sistema ou componente mecânico sujeito às condições dinâmicas, como motores e turbinas. Tal estudo faz-se pelas descobertas de falhas em componentes móveis de um equipamento devido à variação das forças dinâmicas geradas, alterando os deslocamentos. Esses equipamentos mecânicos possuem um nível de vibração normal dentro de suas características de funcionamento estabelecidas na fase de projeto. No entanto, qualquer equipamento ou máquina apresenta desgaste e isso leva, invariavelmente, à quebra ou rompimento de componentes mecânicos (NEPOMUCENO, 1989).

Junto a isso, devido à manutenção inadequada, ocorre falhas nesses equipamentos como desbalanceamento, desalinhamento e empenamento de eixo, folgas mecânicas, desgaste de rolamentos e engrenagens. Dessa forma, devido à má conservação do equipamento, em condições satisfatórias, o nível de vibração é elevado, de tal modo que tanto seu rendimento quanto sua vida útil são comprometidos (HOLANDA, 2016).

Nesse contexto, o engenheiro mecânico deve projetar de forma a reduzir/prevenir tais situações, bem como executar métodos como a manutenção preditiva a partir da análise de vibrações.

A manutenção preditiva é definida segundo Kardec e Nascif (2009, p. 44) como: “[...] a atuação realizada com base na modificação de parâmetros de condição ou desempenho [...]”.

Seu objetivo principal é a prevenção das falhas nos equipamentos mecânicos ao acompanhar os parâmetros diversos, a fim de evitar paradas inesperadas ou indesejadas, bem como substituir peças defeituosas. Assim, promove-se a operação contínua do equipamento pelo maior tempo possível. (KARDEC, NASCIF, 2009; NEPOMUCENO, 1989).

Nesse caso, a partir da observação dos níveis de vibração alterando-se, torna-se possível pressupor o estado futuro de um equipamento pela identificação dos defeitos. Implementa-se, então, um diagnóstico do comportamento das variáveis de tais defeitos no decorrer do tempo de operação (NEPOMUCENO, 1989).

O processo de análise de vibração ocorre, basicamente, em quatro etapas: aquisição de sinais vibracionais, armazenamento, tratamento e análise desses sinais observados. Os dados

referentes à vibração podem ser visualizados no domínio do tempo ou no domínio da frequência. No domínio do tempo, a representação do movimento oscilatório é feita de forma gráfica, na qual os dados observados de posição, velocidade ou aceleração são representados como uma função do tempo. Já no domínio da frequência, a análise é feita por meio do tratamento matemático pela Transformada Rápida (ou discreta) de Fourier (FFT).

A FFT, de acordo com Gonçalves (2004, p. 3), “[...] é, em essência, uma ferramenta matemática que realiza a transição entre variáveis tempo e frequência de sinais”. Este método tem o intuito de identificar defeitos nos componentes móveis dos equipamentos de maneira mais fácil. A transformada discreta de Fourier é uma poderosa ferramenta no que se refere ao processamento de um sinal digital. Isso porque, por meio dela, pode-se analisar e projetar sistemas no domínio de frequência (AMBROZIO, 2018). Tal método, portanto, será utilizado neste trabalho.

O pêndulo simples

Segundo Halliday, Resnick e Walker (2013), considera-se um pêndulo simples aqueles que podem ser representados por uma partícula de massa m , que compõe o peso do pêndulo e estará suspensa em uma das extremidades de um fio inextensível de massa desprezível e comprimento L , onde sua outra extremidade está fixa em um suporte superior. O pêndulo simples irá oscilar em apenas um plano, passando por uma reta vertical do ponto fixo do fio indo para esquerda ou direita.

O pêndulo simples é uma pequena bola pendurada no final de um fio que oscila em um plano (BENITO *et al.* 2005, p. 168). Ainda segundo o autor, o pêndulo representa um modelo básico que está presente em todos os cursos gerais de Física, tanto no Ensino Médio quanto nos universitários. O estudo do pêndulo também é um exercício obrigatório no estudo da dinâmica ou na revisão das aplicações das equações diferenciais na física.

Para Lara *et al.* (2012), o pêndulo simples é muito utilizado no ciclo básico de engenharia, sendo abordada nos laboratórios como forma de apoio ao ensino de conceitos de mecânica e eletromagnetismo.

A equação do pêndulo simples pode ser utilizada para a determinação da gravidade g , conforme apresentado por Martínez-Pérez (2015). Podem ser usados até mesmo instrumentos como acelerômetros na medição de seu valor.

O pêndulo tem um papel muito importante e é amplamente utilizado em nossa cultura, mesmo assim é necessário que os educadores envolvidos ampliem o seu uso em sala como forma de enriquecimento do conhecimento (MATTHEWS, 2006, p. 3).

O objetivo deste trabalho é apresentar uma metodologia alternativa para a coleta e análise de dados de vibração, como frequência, período, aceleração e velocidade, de um pêndulo simples, propondo sua utilização como uma ferramenta alternativa, acessível e de baixo custo, podendo ser reproduzida e conseqüentemente utilizada em aulas de engenharia.

REFERENCIAL TEÓRICO

Ambrozio (2018) desenvolveu um sistema simples e didático, composto pelo Arduino Uno e um acelerômetro modelo MPU-6050, capaz de capturar frequências de vibração na simulação de defeitos em máquinas, como desbalanceamento. Apresentou, também, como os defeitos mecânicos são prejudiciais a um equipamento mecânico, levando-o a elevados níveis de

vibração e, por conseguinte, a falhas de fadiga. Para isso, o autor coletou dados de vibrações de um motor de indução trifásico.

Já Cuarelli (2013), desenvolveu um sistema de referência para estimação de parâmetros da marcha humana para fins fisioterapêuticos. Visando simular o movimento de uma perna humana, o autor fez medições por meio de sensores inerciais. Para tanto, acoplou tais sensores em um pêndulo para medição dos parâmetros. Utilizou-se, também, um microcontrolador Arduino Uno para aquisição de dados de vibração em conjunto com o acelerômetro MPU-6050. Filho (2014) propõe um sistema sem fio para monitoramento e identificação de características dinâmicas de estruturas civis. O autor desenvolveu um sistema de instrumentação para aquisição, transmissão e processamento de dados para análise de vibrações em estruturas civis via sensores de aceleração. Nesse trabalho, utilizou-se o Arduino Nano em conjunto com o acelerômetro MPU-6050 para coleta de dados.

Varanis *et al.* (2016) propõe a análise de vibrações mecânicas no domínio do tempo e no domínio da frequência utilizando a plataforma Arduino. O trabalho tem como objetivo desenvolver um sistema de coleta de sinais de fácil uso, baixo custo e precisão boa, validando seu emprego para fins educacionais. O autor fez a comparação dos resultados experimentais com os resultados obtidos através da modelagem, por meio de modelos analíticos e de simulação computacional. Para tanto, aplicou-se tal método em uma viga engaste-livre, uma viga engaste-apoio e uma viga engaste-engaste. Utilizou-se a plataforma Arduino Mega em conjunto com o acelerômetro MPU-6050.

MATERIAIS E MÉTODOS

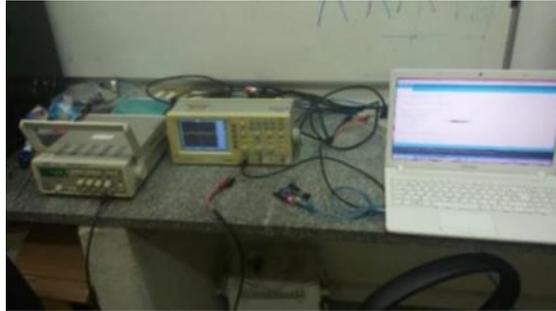
Os materiais utilizados neste trabalho foram:

- Arduino Uno;
- Acelerômetro MPU - 6050;
- Fios (jumpers);
- Notebook;
- Cabo Usb;
- Software (Arduino);
- Software (FFT);
- Gerador de Tensão;
- Osciloscópio;
- Pêndulo.

A metodologia deste trabalho foi feita com base na revisão da literatura, aliada ao estudo das características e da arquitetura dos sensores de vibrações, bem como as características e da arquitetura do microprocessador Arduino. Assim, foi possível programar o Arduino para atender à etapa de validação e de teste prático.

A seguir, descreve-se as etapas metodológicas utilizadas para verificar a eficiência do aparato proposto na aquisição e análise dos sinais de vibrações, de forma a validá-lo. Para tanto, utilizou-se um gerador de sinais de tensão cujas amplitudes e frequências dos sinais gerados eram conhecidas de antemão, conforme observado na Figura 1.

Figura 1 - Gerador de tensão, osciloscópio, Arduino e notebook



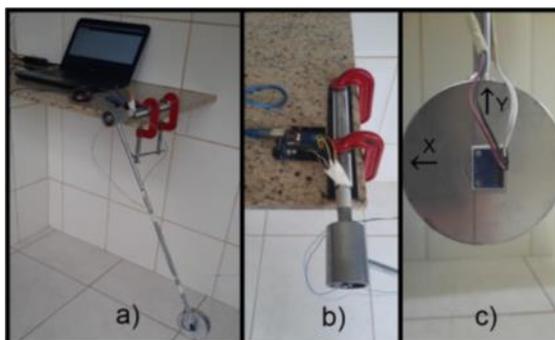
Fonte: Acervo dos autores (2021).

Dessa forma, implementou-se as seguintes etapas para o aferimento:

- Fez-se a programação do microcontrolador Arduino considerando o registro do instante em que cada amostra foi lida e o ajuste da velocidade de aquisição de dados;
- Utilizou-se um gerador de tensão para produzir uma tensão de características pré-determinadas: ondas de formato senoidal cujas frequências e amplitudes podem ser controladas;
- Conectou-se o gerador de tensão no osciloscópio, sendo possível observar as grandezas mencionadas anteriormente, ajustando os sinais às frequências e amplitudes conhecidas (Figura 1);
- Com o gerador de tensão conectado ao Arduino, gerou-se um arquivo texto, no formato “.txt”, contendo os dados lidos;
- Fez-se o tratamento dos sinais de forma numérica. Utilizou-se um programa computacional, My FFT Program, desenvolvido por um dos autores deste trabalho, para efetuar o cálculo da transformada rápida de Fourier (FFT);
- Fez-se uma análise gráfica comparativa no domínio do tempo entre os dados observados no osciloscópio e dados de leitura do Arduino. Para tanto, utilizou-se o programa Microsoft Excel;
- Plotou-se os dados no domínio da frequência para determinação precisa das amplitudes e frequências lidas pelo microcontrolador Arduino;
- Após aferida a metodologia proposta para coleta de dados, utilizou-se como prática um pêndulo simples, mostrado na Figura 2. Nessa última etapa, utilizou-se o acelerômetro MPU - 6050 para a aquisição dos dados de vibração, bem como das grandezas do movimento do pêndulo, comparando-as com a literatura da Física.

O pêndulo simples utilizado na aplicação prática possui estrutura metálica, conforme mostrado pela Figura 2 a). Fixou-o junto à uma bancada plana por meio de dois grampos C, como ilustrado pela Figura 2 b). O pêndulo possui uma haste de 0,6 metros, cuja rotação é devida à um eixo acoplado em um rolamento. Soldada ao eixo, segue uma haste delgada onde, também, foi soldada à sua extremidade uma massa concentrada na forma de um cilindro achatado, no qual fixou-se o acelerômetro. O plano utilizado para a orientação do movimento foi o XY, mostrado pela Figura 2 c).

Figura 2 - a) Pêndulo de haste de comprimento de 0,6 m b) fixação do pêndulo com grampos C c) cilindro achatado com o acelerômetro fixo.



Fonte: Acervo dos autores (2021).

Assim, coletou-se os dados de aceleração do movimento do pêndulo. Para tanto, utilizou-se o acelerômetro MPU-6050. Por fim, determinou-se a velocidade na direção normal do movimento oscilatório do pêndulo por meio da teoria da Física. Em seguida, comparou-se com os resultados obtidos experimentalmente a fim de verificar a confiabilidade/acurácia do conjunto Arduino-acelerômetro.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na fase de aferimento, fez-se cinco experimentos, nos quais obteve-se os sinais de tensão adquiridos no tempo e posteriormente transformados no domínio da frequência pela FFT. Para melhor entendimento, apresentam-se na Tabela 1, abaixo, os valores de frequência e de amplitude de tensão gerados pela fonte e lidos pelo Arduino. Dessa forma, valida-se o Arduino como instrumento eficaz na coleta de dados de oscilatórios, haja vista o baixo erro de leitura quando comparado aos dados apresentados pelo osciloscópio.

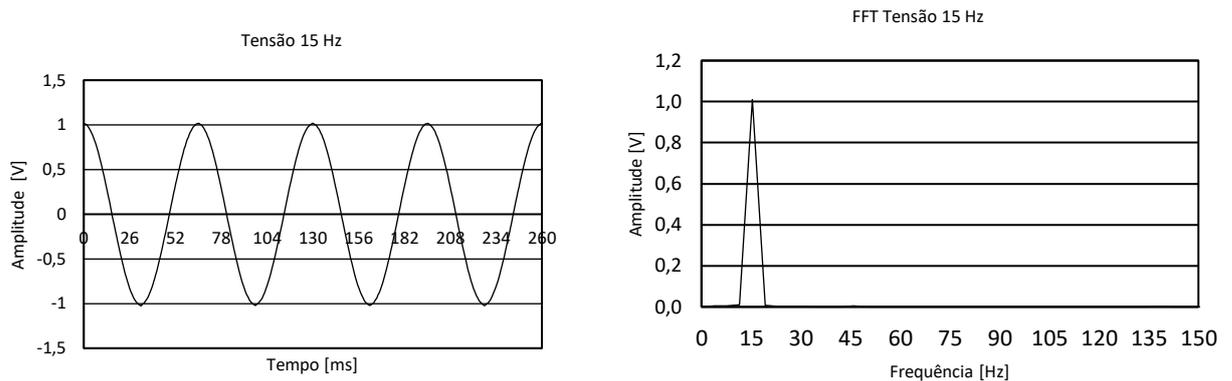
Em seguida, apresentam-se de forma gráfica, por meio das Figuras 3 e 4, dois sinais de tensão lidos pelo Arduino no domínio do tempo, e seus respectivos espectros de frequência (sinal no domínio da frequência). Os gráficos correspondem as frequências de 15,3 Hz, 60,01 Hz e 100 Hz conforme mostrado na Tabela 1.

Tabela 1 - Comparação entre os dados de várias ondas senoidais coletados no Arduino com os dados fornecidos no osciloscópio, bem como o erro da frequência associado.

Experimento	Dados lidos pelo Arduino			Dados lidos pelo osciloscópio			Erro referente à frequência [%]
	frequência [Hz]	período [ms]	amplitude [V]	frequência [Hz]	período [ms]	amplitude [V]	
1	15,338	62,58	1,036	15,3	65,36	1,04	0,25
2	30,08	32,47	1,018	30,04	33,29	1	0,159
3	59,95	16,104	1,013	60,01	16,66	1,02	0,096
4	98,87	9,66	1,018	100	10	1,06	1,127
5	194,25	4,84	0,94	200,1	4,99	1	2,92

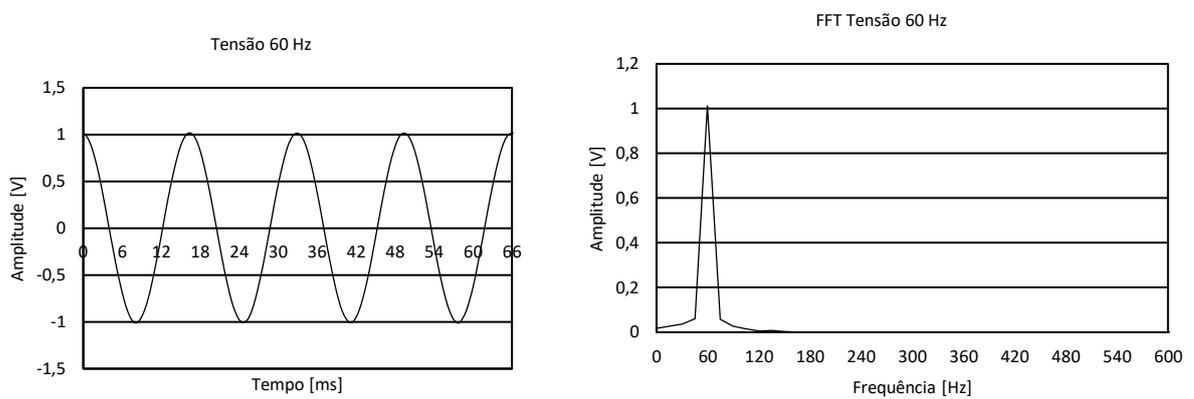
Fonte: Elaborado pelos autores (2021).

Figura 3 - Onda senoidal de 15,3 Hz; frequência calculada pela FFT: 15,33 Hz.



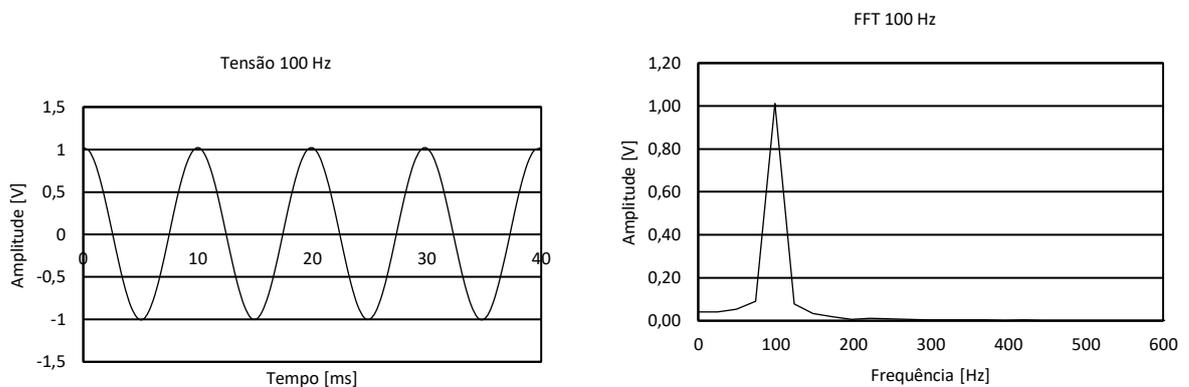
Fonte: Elaborado pelos autores (2021).

Figura 4 - Onda senoidal de 60,01 Hz; frequência calculada pela FFT: 59,95 Hz.



Fonte: Elaborado pelos autores (2021).

Figura 5 - Onda senoidal de 100 Hz; frequência calculada pela FFT: 98,87 Hz.



Fonte: Elaborado pelos autores (2021).

No teste dos casos práticos, colocou-se o acelerômetro na extremidade da haste do pêndulo. Para a orientação da aceleração, utilizou-se o plano XY para as acelerações normal (eixo Y) e tangencial (eixo X): Figura 2 c). Foram feitos um total de sete experimentos utilizando

o pêndulo. Assim que coletados os dados de aceleração, fez-se a FFT do sinal e, em seguida, pôde-se verificar a congruência dos valores lidos pelo sensor, com os valores teóricos da literatura da Física.

Para a determinação dos valores teóricos de frequência, utilizou-se dois modelos encontrados na literatura:

O primeiro deles, para pequenas oscilações (ângulos pequenos, de até 10°) é válida a seguinte aproximação: $\text{sen}(\theta) \cong \theta$, que pode ser utilizada para a dedução do período do movimento do movimento do pêndulo, representado na equação 1 (BAKER; BLACKBURN, 2005):

$$T_0 = 2\pi \sqrt{\frac{L}{g}} \quad (1)$$

Na qual o L representa o comprimento da haste em metros, e g a aceleração da gravidade, cujo valor assumido foi de $9,81\text{m/s}^2$.

Utilizou-se também a fórmula de Bernoulli para o cálculo do período do pêndulo, considerando ângulos maiores compreendidos entre 10° e 40° , apresentada pela equação 2. (LIMA; ARUN, 2006).

$$T_B = T_0 \left(1 + \frac{\theta_0^2}{16} \right) \quad (2)$$

Assim, θ_0 é o ângulo máximo da haste do pêndulo com a vertical, em radianos, e T_0 é o período obtido pela equação 1, em segundos.

Tais limites angulares refletem uma baixa margem de erro quando se compara as equações 1 e 2 com o período exato do pêndulo (LIMA; ARUN, 2006).

Invertendo-se as equações 1 e 2, obtém-se a frequência do movimento.

Ressalta-se que o acelerômetro se encontra fixado a um referencial não inercial. Assim, a medida de aceleração que o sensor “enxerga” difere daquela que de fato aplica-se ao corpo. A aceleração medida no eixo Y corresponde à seguinte expressão:

$$a_y = a_n + g \cdot \cos(\theta) \quad (3)$$

sendo: $-\theta_0 \leq \theta \leq \theta_0$.

Assim, graças à simetria da função $\cos(\theta)$, para θ variando entre $\pm\theta_0$, a frequência lida pelo Arduino, na direção normal (Y), é duas vezes aquela determinada pelo inverso da equação (1) ou (2). Nesse caso, basta dividir a frequência determinada experimentalmente pela metade.

Com relação à aceleração lida na direção X, aplicam-se as mesmas observações feitas com relação à leitura do acelerômetro na direção Y. No entanto, como forças dissipativas não modeladas também influenciam o movimento em X, obtém-se como leitura um sinal periódico cuja determinação de seu significado físico requer um estudo mais aprofundado do assunto. Neste trabalho, utilizou-se os dados de aceleração na direção normal do movimento do pêndulo (eixo Y), para a análise de vibração. No entanto, a leitura em X pode ser representada, de forma genérica, pela seguinte expressão:

$$a_x = -\alpha \cdot \text{sen}(\theta) \quad (4)$$

onde $-\theta_0 \leq \theta \leq \theta_0$, α é uma constante a determinar. Como a função $\text{sen}(\theta)$ não apresenta simetria para θ variando entre $\pm\theta_0$, a frequência lida pelo Arduino corresponde à mesma frequência calculada pelo inverso da equação (1) ou (2).

Na Tabela 2, apresentam-se os valores de frequência teóricos e medidos de forma experimental utilizando-se o Arduino e a FFT em cada experimento. A seguir, são mostrados, pelas Figuras 7 e 8, os dados de aceleração normal variando com o tempo, lidos pelo

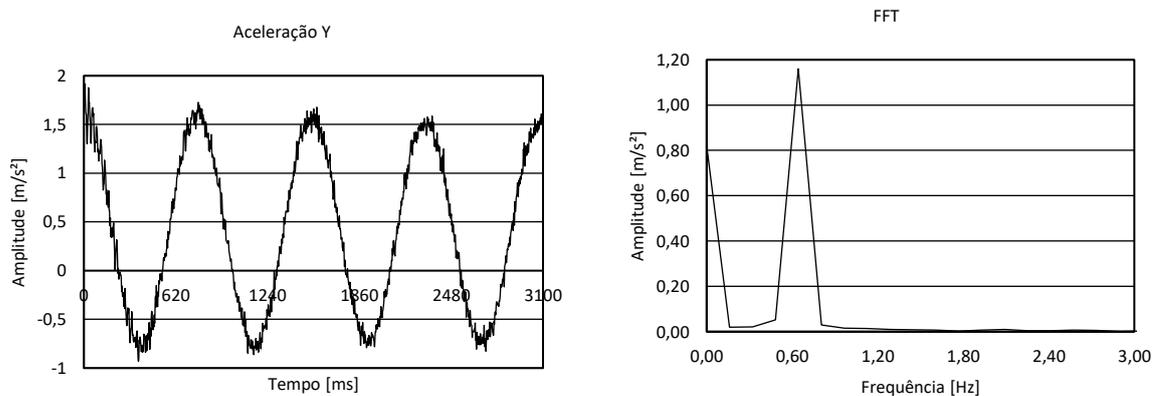
acelerômetro MPU - 6050, bem como a FFT associada. Tais gráficos são relativos aos experimentos 2 e 3.

Tabela 2 - Comparação entre as frequências teóricas e experimentais, bem como o ângulo inicial e o erro da frequência associado.

Experimento	Ângulo (°)	Freq. T ₀ (Hz)	Freq. Bernoulli (Hz)	Freq. medida (Hz)	Erro F. T ₀	Erro F. Bernoulli
1	26,060151	0,643545	0,643054	0,642847	0,108427%	0,032089%
2	23,316370	0,643545	0,643150	0,643542	0,000553%	0,060937%
3	44,900528	0,643545	0,642058	0,634542	1,398925%	1,170540%
4	39,345830	0,643545	0,642421	0,634594	1,390917%	1,218393%
5	25,176717	0,643545	0,643086	0,642700	0,131314%	0,059969%
6	28,155929	0,643545	0,642996	0,642738	0,125356%	0,040047%
7	31,240265	0,643545	0,642852	0,642059	0,231003%	0,123480%

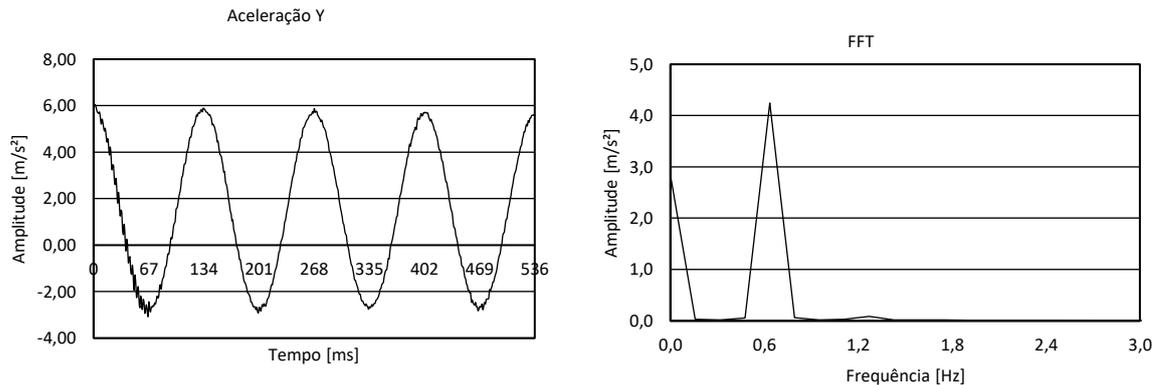
Fonte: Elaborado pelos autores (2021).

Figura 6 - Experimento 2: Aceleração normal (Y); frequência calculada pela FFT: 0,643 Hz.



Fonte: Elaborado pelos autores (2021).

Figura 7 - Experimento 3: Aceleração normal (Y); frequência calculada pela FFT: 0,634 Hz

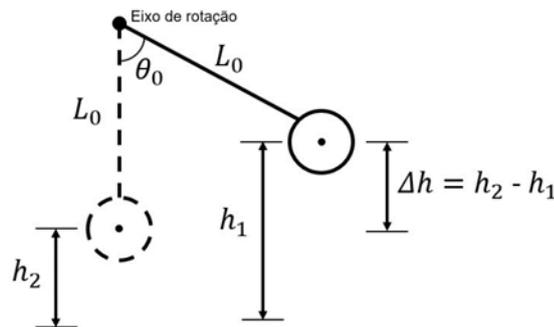


Fonte: Elaborado pelos autores (2021).

Torna-se evidente, portanto, a eficiência da coleta dos dados de vibração, o que pode ser comprovado por meio da comparação das frequências obtidas de forma teórica e experimental.

Analisando o movimento do pêndulo, determinou-se, de forma teórica e por meio da aceleração normal medida pelo Arduino, a velocidade no ponto mais baixo de sua trajetória com o objetivo de verificar a acurácia do acelerômetro para leitura de dados. Para tanto, realizou-se os experimentos onde o movimento do pêndulo inicia-se num determinado ângulo θ_0 com a vertical. Pela diferença de alturas, em metros, determina-se o ângulo θ_0 em graus pela equação 5 abaixo. Também, com base nos princípios de conservação de energia, por meio da equação 6, pôde-se determinar a intensidade da velocidade, em m/s, com que o pêndulo passa no ponto mais baixo de sua trajetória.

Figura 8 - Esquema utilizado para o cálculo da aceleração normal do pêndulo



Fonte: Elaborado pelos autores (2021).

Com base na Figura 8, pode-se determinar:

$$\Delta h = -[L_0 - L_0 \cos(\theta_0)] \quad (5)$$

$$\Delta T + \Delta V = (mv^2/2) + mg\Delta h = 0 \quad (6)$$

Assim, pode-se determinar a intensidade da aceleração normal a_n no ponto mais baixo da trajetória, em m/s^2 , por meio da equação 7:

$$a_n = \frac{v^2}{L_0} \quad (7)$$

Por fim, a Tabela 3, a seguir, apresenta os valores da velocidade teórica e da velocidade medida de forma experimental, utilizando-se o Arduino e a FFT.

Tabela 3 - Comparação entre dados teóricos e experimentais da aceleração normal (Y)

Experimento	Teta inicial (°)	Velocidade teórica (m/s ²)	Velocidade medida (m/s ²)	Erro velocidade
1	26,060151	1,093993	1,093259	0,067107%
2	23,316370	0,980500	0,970732	0,996223%
3	44,900528	1,852971	1,843686	0,501069%
4	39,345830	1,633499	1,630204	0,201751%
5	25,176717	1,057516	1,055641	0,177322%
6	28,155929	1,180263	1,181930	0,141291%
7	31,240265	1,306499	1,311195	0,359450%

Fonte: Elaborado pelos autores (2021).

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste trabalho, utilizou-se o Arduino como elemento básico para confecção de um sistema de baixo custo para aquisição e análise dos sinais de vibrações obtidos por meio de um pêndulo simples. Ao aferir o Arduino como instrumento de leitura de dados (amplitude, período e frequência) relativos a sinais de tensão previamente conhecidos, foi possível verificar a precisão e confiabilidade do aparato proposto para aquisição e análise de sinais oscilatórios, sejam estes de tensões ou de vibrações mecânicas.

Como uma primeira aplicação prática, utilizou-se um pêndulo, no qual objetivou-se identificar parâmetros importantes do movimento oscilatório deles, sendo que tal objetivo foi atingido devido aos resultados apresentados neste trabalho.

Os testes práticos foram realizados utilizando-se o acelerômetro, a placa do microcontrolador Arduino, do qual obteve-se, por meio da FFT, um sinal de oscilação representado do domínio da frequência, para dados de aceleração na direção tangencial. Comparou-se os resultados observados entre a frequência teórica e a frequência experimental, bem como a velocidade teórica e experimental. Verificou-se, portanto, a acurácia do aparato proposto no que se refere à medida e observação dos parâmetros mais relevantes no movimento oscilatório do pêndulo, haja vista que os resultados expressos nas Tabelas 2 e 3 estão em concordância com a literatura da Física.

Embora os experimentos realizados neste trabalho estejam numa faixa de frequência bem abaixo daquelas que de fato se encontram em sistemas de manutenção, foram cruciais para o entendimento das dificuldades que se tem ao fazer medidas práticas e como elas podem ser superadas.

Portanto, abre-se o caminho para aplicação da metodologia desenvolvida e apresentada neste trabalho às situações que envolvem faixas mais elevadas de frequência.

Ademais, o sistema de baixo custo proposto possibilita a construção de sequência didática para o ensino dos conceitos de mecânica clássica, tais como velocidade, aceleração, tensão, período, frequência e conservação da energia. Ao reproduzir essa atividade prática o aluno poderá ampliar seu horizonte de conhecimentos em relação aos conceitos supracitados.

AGRADECIMENTOS

Agradecemos ao Ifes pelo aporte financeiro.

REFERÊNCIAS

AMBROZIO, M. R. **Sistema de baixo custo para coleta de dados de vibração para fins de manutenção preditiva**. 2018. Trabalho de Conclusão de Curso, (Bacharelado em Engenharia Mecânica) - Instituto Federal do Espírito Santo, Cachoeiro de Itapemirim, 2018.

BAKER, G. L.; BLACKBURN, J. A. **The Pendulum: a case study in physics**. Illustrated Edition. New York: Oxford University Press Inc., 2005.

BENITO, Julio V. Santos; GRAS-MARTI, Albert; SOLER-SELVA, Vicent. Recursos para La enseñanza Del péndulo simple: imágenes, mediciones, simulaciones y guías didácticas. **Caderno Brasileiro de Ensino de Física**, v.22, n.02, p, 165-189, 2005.

CUARELLI, G. **Estimação de parâmetros de marcha humana a partir de medições feitas por acelerômetros e giroscópios e uso de mecanismo de referência**. 2013. 119 f. Dissertação, (Mestrado em Automação e Controle de Processos) - Faculdade de Engenharia, Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de São Paulo, São Paulo, 2013.

FILHO, E. G. E. **Proposta de um sistema sem fio para monitoramento e identificação de características dinâmicas de estruturas civis**. 2014. 75f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia de Controle e Automação) - Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2014.

HALLIDAY, D.; RESNICK, R, e WALKER, J. **Fundamentos da Física**. Rio de Janeiro; Livros Técnicos e Científicos Editora S/A, 9 ed., v.2, 2013.

HOLANDA, S. M. S. **Aplicação da manutenção preditiva por análise de vibrações em equipamentos de trens urbanos com plano de manutenção proposto**. 2016. 92 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Faculdade de Engenharia, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2016.

KARDEC, A.; NASCIF, J. **Manutenção Função Estratégica**. 3 ed. Rio de Janeiro: Qualitymark, 2009.

LARA A., SEGUNDO, ZULUAGA H., RAUL A., MARIN R., WILLIAM, RAMÍREZ R., RAMIRO. Estudio Experimental de un Pendulo Físico Utilizando um Microcontrolador at - 892051. *Scientia Et Technica [online]*, v.2 n.25, p.245-249, 2004.

LIMA, F. S. M.; ARUN, P. An accurate formula for the period of a simple pendulum oscillating beyond the small angle regime. *American Journal of Physics*, v. 74, n.10, 2006.

MARTÍNEZ-PÉREZ, J. E. Obtención del valor de La aceleración de La gravedad em el laboratorio de física. Experiencia comparativa del sensor de um teléfono celular inteligente y el péndulosimple. *Revista Eureka sobre Enseñanza y Divulgación de las Ciencias*, v.12, n,2, p.341-346, 2015.

MATTHEWS, Michael. The International Pendulum Project. *Revista Electrónica de Investigación en Educación en Ciencias*, v. 1, n.1, p. 1 - 5, 2006.

NEPOMUCENO, L.X. *Técnicas de Manutenção Preditiva*. São Paulo: Blucher, 2008.

RAO, S. *Vibrações Mecânicas*. 4 ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2008.

VARANIS, M. *et al.* 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, 1301, 2016.

Submetido em: janeiro de 2022

Aprovado em: maio de 2022