



Universidade de Brasília

FACULDADE UnB PLANALTINA

CIÊNCIAS NATURAIS

**PRODUÇÃO DE DISPOSITIVO PARA
MEDIDAS DE VIBRAÇÕES MECÂNICAS E
DAS PROPRIEDADES DE ONDAS
SONORAS UTILIZANDO A TECNOLOGIA
DE ARDUINOS.**

AUTOR: HÉRIQUE MOREIRA DOS SANTOS

**ORIENTADOR: ARMANDO DE MENDONÇA
MAROJA**

Planaltina - DF

Novembro 2019



Universidade de Brasília

FACULDADE UnB PLANALTINA

CIÊNCIAS NATURAIS

**PRODUÇÃO DE DISPOSITIVO PARA
MEDIDAS DE VIBRAÇÕES MECÂNICAS E
DAS PROPRIEDADES DE ONDAS
SONORAS UTILIZANDO A TECNOLOGIA
DE ARDUINOS.**

**AUTOR: HÉRIQUE MOREIRA DOS SANTOS
ORIENTADOR: ARMANDO DE MENDONÇA
MAROJA**

Planaltina - DF

Novembro 2019

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Banca Examinadora, como exigência parcial para a obtenção de título de Licenciado do Curso de Ciências Naturais, da Faculdade UnB Planaltina, sob a orientação do Prof. Armando de Mendonça Maroja.

Planaltina - DF

Novembro 2019

DEDICATÓRIA

Dedicamos este trabalho a todos àqueles que acreditam que a ousadia e o erro são caminhos para as grandes realizações.

RESUMO

A tecnologia de Arduino tem sido uma solução prática de baixo custo que permite produzir dispositivos de medida para o uso em laboratórios de ensino de ciências. Com esses dispositivos é possível a medida de grandezas físicas como a aceleração gravitacional, a frequência de ondas, a condutividade elétrica e o tempo de descarga de um capacitor. Outra vantagem que a placa Andino oferece, por ser um material barato e acessível, é a possibilidade de ser usada como uma ferramenta didática para o trabalho docente no ensino de física. Iniciamos com a avaliação experimental dos sensores de som e de vibração disponíveis no mercado. Como resultado da avaliação foram produzidos dispositivos para medidas de espectros sonoros na faixa de 20Hz a 16kHz e de vibrações mecânicas de até 500kHz. Após a série de estudos dos sensores e a montagem de circuitos, foram avaliados o som de um diapasão de 440Hz e espectros sonoros de osciladores na faixa de 500Hz a 16kHz e o espectro de som e de vibração do violão profissional. Os erros percentuais na medida da frequência das ondas sonoras e das vibrações quando comparadas com as medidas realizadas pelo software Audacity foram menores ou iguais a 3%. Foi possível também observar que as vibrações no tampo do violão profissional estão em fase com as ondas sonoras em certos pontos e fora de fase em outros pontos, caracterizando a existência de ondas estacionárias no tampo do violão. Na segunda etapa do estudo de caso do violão, foram avaliados os espectros sonoros e vibracionais de dois violões, um profissional e outro padrão. Os erros percentuais nas medidas de som e vibração das cordas do violão padrão foram menores ou iguais a 36%, e os do violão profissional foram menores ou iguais a 13%. Outro ponto importante foi observar que as ondas vibracionais e sonoras tiveram uma diferença de fase no valor de $\pi/2$ no tampo superior e inferior do violão padrão, por fim, foi feita uma comparação dos espectros de som e vibração medidos pelo dispositivo com os espectros de som realizados pelo Audacity chegando a valores próximos do valor padrão da corda Mi (6) de 82Hz. Os espectros de frequência das medidas de som e de vibração realizadas pelo dispositivo foram próximos quando comparado com os espectros realizados pelo Audacity.

Palavras chaves: Arduino, som, vibrações, violão.

Abstract

Arduino's technology has been a practical, low-cost solution that makes it possible to produce measuring devices for use in science teaching laboratories. With these devices it is possible to measure physical quantities such as gravitational acceleration, wave frequency, electrical conductivity and the discharge time of a capacitor. Another advantage that the Andean plaque offers, as it is a cheap and accessible material, is the possibility of being used as a didactic tool for teaching work in the teaching of physics. We started with the experimental evaluation of the sound and vibration sensors available on the market. As a result of the evaluation, devices were produced to measure sound spectra in the range 20Hz to 16kHz and mechanical vibrations up to 500kHz. After the series of studies of the sensors and the assembly of circuits, the sound of a 440Hz tuning fork and sound spectra of oscillators in the range 500Hz to 16kHz and the sound and vibration spectrum of the professional guitar were evaluated. The percentage errors in the measurement of the frequency of sound waves and vibrations when compared with the measurements made by the Audacity software were less than or equal to 3%. It was also possible to observe that the vibrations in the top of the professional guitar are in phase with the sound waves in certain points and out of phase in other points, characterizing the existence of stationary waves in the top of the guitar. In the second stage of the guitar case study, the sound and vibrational spectra of two guitars, one professional and the other standard, were evaluated. The percentage errors in the sound and vibration measurements of the standard guitar strings were less than or equal to 36%, and those of the professional guitar were less than or equal to 13%. Another important point was to observe that the vibrational and sound waves had a phase difference in the value of $\pi / 2$ in the top and bottom of the standard guitar, finally, a comparison of the sound and vibration spectra measured by the device with the spectra was made. of sound performed by Audacity reaching values close to the standard value of the Mi (6) string of 82Hz. The frequency spectra of the sound and vibration measurements performed by the device were close when compared to the spectra performed by Audacity.

Keywords: Arduino, sound, vibrations, guitar.

1. INTRODUÇÃO

As ondas sonoras e as vibrações estão presentes nos materiais e em diversos objetos em nossa volta, desde uma simples molécula de ar até em grandes edifícios e mesmo nos terremotos que produzem ondas sísmicas. Halliday et al. (2009), comentam que o nosso mundo está repleto de oscilações, nas quais os objetos se movem repetidamente de um lado para outro. “Uma vibração ou oscilação é um movimento bamboleante com o transcorrer do tempo” (HEWITT, 2011 , p 339).

O som é o resultado da vibração de um objeto oscilante em contato com ar, água ou qualquer meio material sólido. Nossos ouvidos são detectores de ondas sonoras na faixa de 20Hz a 20kHz. Bistafa (2011), define o som como uma sensação produzida no nosso sistema auditivo, sensação que é decorrente das oscilações ocasionadas por objetos vibrantes como o violão ou um alfinete quando cai no chão.

Para uma onda sonora percorrer certa distância, o meio sofre uma série de compressões e rarefações ao longo da direção de propagação. Quando a onda sofre uma contração, a pressão naquele ponto aumenta, e quando sofre expansão, ela diminui. Essas variações de pressão no meio, quando chegam ao ouvido humano, são captadas e dão a sensação de som. Portanto os nossos ouvidos são sensores de pressão. Tanto os sons como as vibrações são movimentos ondulatórios que se propagam em um meio material, que os definem como ondas mecânicas.

Uma onda é caracterizada pelo seu período T (ou frequência f), amplitude e o seu comprimento de onda. O período de uma onda é o tempo de um movimento para completar uma oscilação, segundo Halliday et al. (2009). Na prática o período médio “ T ” de uma onda é calculado através da seguinte relação:

$$T = (t_f - t_i) / N \quad (1)$$

Onde “ N ” corresponde ao número de oscilações completas, t_i e t_f correspondem ao tempo inicial e o tempo final referentes as N oscilações completas da onda. Já a frequência f de uma onda ou de um movimento oscilante, é o número de ciclos por unidade de tempo como destaca Bistafa (2011). A unidade de medida da frequência no SI (Sistema Internacional de Unidades) é Hertz (Hz). Dessa forma a frequência é calculada como o inverso do período.

$$f = 1 / T \quad (2)$$

A Figura 1 apresenta o sinal harmônico captado pelo microfone (sensor de som) ligado ao Arduino localizado próximo a um diapasão. Um sinal harmônico é um som puro com uma frequência específica. Observe que 9 (nove) oscilações da onda foram captadas pelo microfone, iniciando em $t_i = 12,003824$ s e terminando em $t_f = 12,024180$ s.

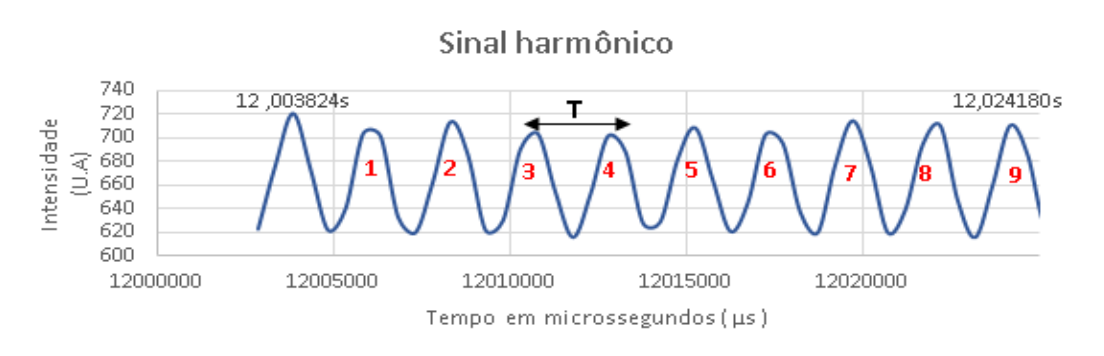


Figura 1: Sinal harmônico captado pelo dispositivo produzido colocado próximo ao um diapasão 440Hz

As equações 1 e 2 fornecem os seguintes valores para T e f do sinal harmônico com 9 oscilações entre $t_i = 12,003824$ s e $t_f = 12,024180$ s, logo a Eq 1 nos dá

$$T = (12,024180 - 12,003824)/9 = 0,00226s.$$

e a Eq 2 nos dá uma frequência

$$f = 1/0,00226s = 442Hz.$$

A ressonância sonora ou acústica é ocasionada quando uma fonte emite um som de frequência igual à frequência de vibração natural de um receptor. Como em todo tipo de ressonância, ocorre uma amplificação do som, aumentando a intensidade, como por exemplo, a corda de um violão quando tocada, entra em ressonância com a vibração do corpo do instrumento, sendo assim, amplificando o som da corda ao ser tocada.

Quando uma corda do violão é tocada, o tipo de onda que é gerada na corda esticada nas duas extremidades desta, é estacionária, ou seja, ao longo do meio de propagação da corda, em alguns pontos, a amplitude da onda é nula, onde esses pontos são denominados de nós, em outros pontos a amplitude da onda é máxima, onde os mesmos são chamados de ventre. A Figura 2 mostra um exemplo de uma onda estacionária. Note que na Figura 2, a frequência da mão corresponde a um dos modos de vibração da corda. O ventre da onda é o dobro da amplitude da onda.



Figura 2: Onda estacionária gerada pela movimentação da mão. Fonte: Biologia total

O som musical diferentemente dos ruídos que possuem uma conotação indesejável como o barulho de um motosserra, são ondas sonoras com frequências definidas, que são denominadas musicalmente como notas. Segundo Ramalho et al. (2012), notas musicais com sons graves possuem baixas frequências e notas agudas possuem altas frequências.

Outra propriedade do som é a intensidade que dá a característica de som fraco e som forte. Halliday et al. (1993) definem a intensidade sonora como a taxa média de transmissão de energia em um certo intervalo de tempo por área. A unidade de medida no SI (Sistema Internacional de Unidades) para intensidade é o Watt/m². De acordo com a fórmula abaixo temos:

$$I \text{ (intensidade)} = P \text{ (potência)} / A \text{ (área)} \quad (3)$$

A intensidade sonora também pode ser expressa em decibéis, dB, que segundo Bistafa (2009), é uma unidade de sensação. “Harvey Fletcher (1884-1981) verificou que 1dB era a mínima variação da potência sonora detectável pelo sistema auditivo”(BISTAFA, p 30, 2009). De acordo com Bistafa (2009), a unidade de sensação é calculada pela seguinte fórmula:

$$\text{Unidade de sensação} = 10 \times \log (W / W_0) \text{ dB} \quad (4)$$

Onde W é a intensidade do som e W₀ a intensidade de referência.

O Arduino é um micro controlador constituído por pinos de entrada e saída, que permitem interação com dados do ambiente até mesmo a ligação de outros dispositivos eletrônicos. A programação dessa tecnologia é baseada na plataforma C/C++. A placa Arduino apresenta uma versatilidade em termos de adaptação para monitoramento e controle de dados numéricos e possibilita a produção de dispositivos de baixo custo. Sobre a tecnologia de arduinos, o autor SOUZA et al. (2017, p.1) definem:

O Arduino é uma plataforma de hardware open source, de fácil utilização, ideal para a criação de dispositivos que permitam interação com o ambiente, dispositivos estes que utilizem como entrada sensores de temperatura, luz, som etc., e como saída leds, motores, displays, alto-falantes etc., criando desta forma possibilidades ilimitadas.

O Arduino por ser uma ferramenta para diversos projetos, por ser uma placa, abre

diversas possibilidades para o uso em pesquisas científicas e para o ensino de ciências. Cordova e Tort (2016) destacam que as placas arduinos são capazes de medir intervalos de tempo na faixa de milissegundos e microssegundos que permitem obter resultados aceitáveis no laboratório de física básica no ensino médio e no ensino universitário.

A falta de recursos materiais para estudos avançados nos laboratórios destinados ao ensino de física e de ciências e mesmo por estudantes de pós-graduação é uma realidade enfrentada pelos laboratórios de várias instituições de ensino superior públicas e privadas. Os equipamentos comerciais são de alto custo e em sua maioria importados. Silveira e Girardi (2017), afirmam que os materiais nos laboratórios de ciências em escolas públicas têm sido um fator limitante nas práticas experimentais no ensino de física. Por outro lado, todas as escolas têm computadores em laboratórios de informática que são utilizados apenas para pesquisas bibliográficas na internet, sendo assim subutilizados.

Os sensores de vibrações podem ser produzidos a partir da montagem de um sistema experimental que muitas das vezes é acompanhado de uma interface eletrônica para registros de medidas da captação de vibrações mecânicas (desde ondas sísmicas até ondas sonoras) na CPU de um computador. O dispositivo para medida de ondas sonoras e vibrações produzido permite avaliar as oscilações de diversos objetos desde osciladores mecânicos e elétricos até de um violão.

Para verificar se o dispositivo está realizando as medidas corretamente, comparamos as medidas realizadas com as medidas de frequência feitas com o software de edição de áudio Audacity, que além de permitir a visualização das oscilações no tempo de uma onda sonora, tem a ferramenta de análise de espectros de ondas a partir da Transformada de Fourier.

A Transformada de Fourier segundo Bistafa (2011), é uma operação matemática aplicada a um sinal ondulatório com o objetivo de extrair frequências. Através dessa operação de análise, é possível a visualização de espectros sonoros e de outros sinais vibrantes. A Figura 3 mostra o espectro sonoro da corda Mi (6) de 82 Hz, corda mais grave do violão, que foi captada pelo dispositivo. O espectro foi feito no Microsoft Excel através da ferramenta de análise de Fourier. Na figura é encontrado outros picos de frequências. Na Figura 3 é observado outros harmônicos logo após do segundo ($Mi = 164$ Hz).

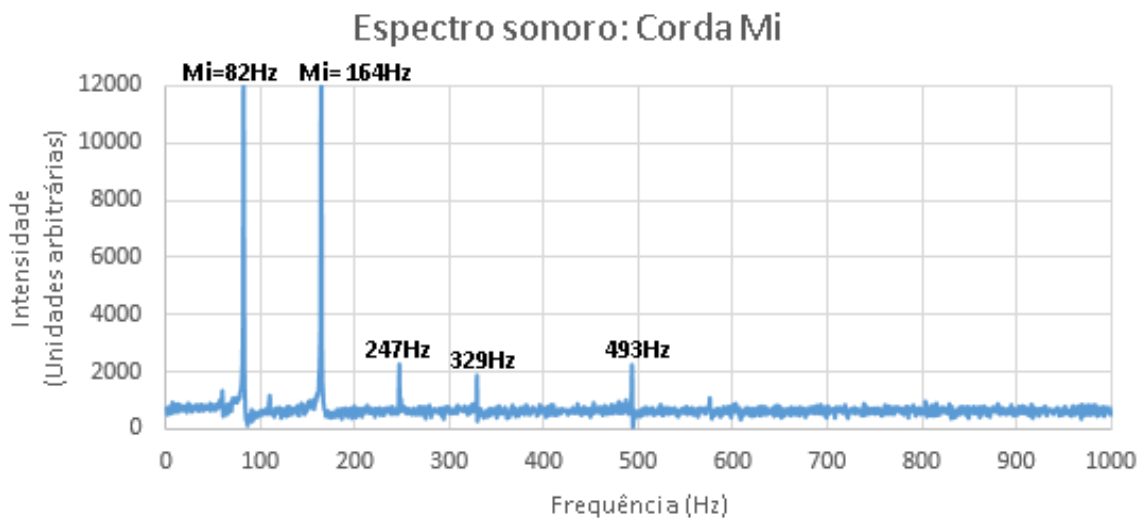


Figura 3: Espectro sonoro da corda Mi, sexta corda.

No presente trabalho utilizamos a ferramenta de Análise de Fourier do Microsoft Excel. Como destaca Oliveira et al. (2017), a Transformada Rápida de Fourier no Microsoft Excel, é capaz de reduzir o número de passos para a determinação do espectro amplitude versus frequência do sinal emitido em forma de intensidade versus tempo, processando os sinais em menor tempo quando comparada com outros métodos tradicionais de processamento de sinais.

O trabalho realizado, permitiu a produção de três protótipos para as medidas de som e vibração. O primeiro foi produzido com a utilização do Arduino UNO que realizava medidas de som em osciladores de aplicativo. O segundo protótipo foi um sensor de som que realizou mais medidas em uma amostra maior com o Arduino DUE em osciladores de aplicativo e um kit diapasão 440Hz. O terceiro protótipo foi o dispositivo para medidas simultâneas de som e vibração utilizado em dois violões diferentes.

2. MATERIAIS E MÉTODO

2.1 Materiais

No desenvolvimento do trabalho foram utilizados os seguintes materiais:

Sensores: Som

O primeiro sensor utilizado nos testes de som, foi o Módulo Sensor Som detecetor de voz, com três pinos, um para alimentação de 5 v (volts), um para aterramento e outro para

saída digital. Além dos três pinos, possui um potenciômetro regulador de sensibilidade.

O segundo sensor de som, foi um Microfone KY038 (Figura 4) , que foi utilizado para as medidas oficiais de som, adaptado para as placas arduinos com quatro pinagens e uma regulação de sensibilidade. Um pino para alimentação de 5 v, um para aterramento, um de saída digital e outro para entrada analógica.



Figura 4: Microfone KY038

Sensores: Vibração

O primeiro sensor para os testes das medidas de vibração, foi o SW18010P com tensão de 3.3 v a 5 v, com quatro pinos de conexão; Um pino de alimentação, um de aterramento, um para saída digital e o outro para saída analógica.

O segundo foi o 2578AY-RG, que também serve para detectar vibrações, que possui três pinos; sendo um de alimentação de 5 v, um de aterramento e o outro para saída analógica. O terceiro sensor foi o acelerômetro MPU6050 (Figura 5), usado nas medidas oficiais de vibração.

O MPU6050 é um acelerômetro e giroscópio que nos fornece valores de intensidade da aceleração e da rotação nos três eixos (x, y e z). Esse sensor, para ser utilizado no Arduino, deve usar a interface wire, que é uma biblioteca que permite comunicação com dispositivos 12C/TWI, como o MPU6050. No Arduino DUE, há duas interfaces de comunicação para o sensor MPU6050, 12C/TWI SDA1 e SCL1 próximas ao pino AREF e a outra nos pinos 20 e 21 de acordo com as especificações no Arduino Referências (2019).

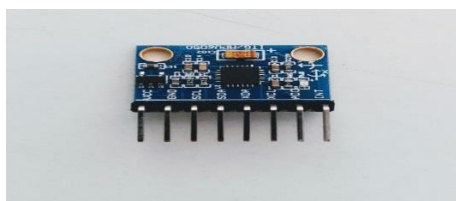


Figura 5: Acelerômetro MPU6050

Arduinos

O primeiro arduino utilizado nas medidas iniciais de som, foi a placa UNO (Figura 6) e o segundo foi a placa DUE (Figura 7). As placas foram ligadas via USB no notebook para então enviar os sinais na tela através do programa Arduino IDE.

O Arduino UNO é constituído por 28 pinos de conexão que permitem a interação com vários dispositivos e sensores. Treze dos pinos são de saídas digitais e cinco são de entradas analógicas e os outros são conectores de alimentação. Possui uma entrada USB de conexão com computadores. Roda com um cristal de 16MHz e possui uma memória de armazenamento de 2 kb. A Figura 6 mostra os componentes da placa UNO.



Figura 6: Arduino UNO. Fonte: Arduino e Pi-Lab

O Arduino DUE, diferentemente da placa UNO, possui 86 pinos e duas entradas USB. Roda com um cristal de 84 MHz, ou seja, possui uma capacidade de processamento mais rápido quando comparada com a placa UNO. Sua memória de armazenamento de dados é de 32 kb. A Figura 7 mostra o Arduino DUE. Os pinos de A0 até DAC1, são os de entrada e de saída analógicas e os pinos descritos por números são os de entrada e saída digitais.



Figura 7: Arduino DUE. Fonte: Arduino Paraná

Kit Diapásio 440Hz

Nas medidas teste de som, utilizamos um kit diapasão do laboratório de física. O kit é composto por um martelo percussivo, um diapasão de 440Hz e uma caixa acústica que amplifica o som produzido pelo diapasão.

Celular e o aplicativo Gerador de Som de Frequência

Nas medidas de som, além do kit diapasão, utilizamos o celular como fonte de sinais harmônicos que foram ajustados através do aplicativo de celular chamado Gerador de Som de Frequência. O aplicativo permite gerar ondas sonoras com frequência precisas na faixa de 1Hz a 22kHz. O aplicativo é disponível na PlayStotre e pode ser baixado livremente nos smartphones.

Violões

No estudo de caso dos violões, utilizamos dois violões para as medidas simultâneas de som e vibração. Um violão com cordas de nylon, de uso profissional (Figura 8) e outro com cordas de aço para uso didático, o violão padrão (Figura 9). As Figuras 8 e 9 mostram os dois violões utilizados no trabalho medidos pelo dispositivo produzido.

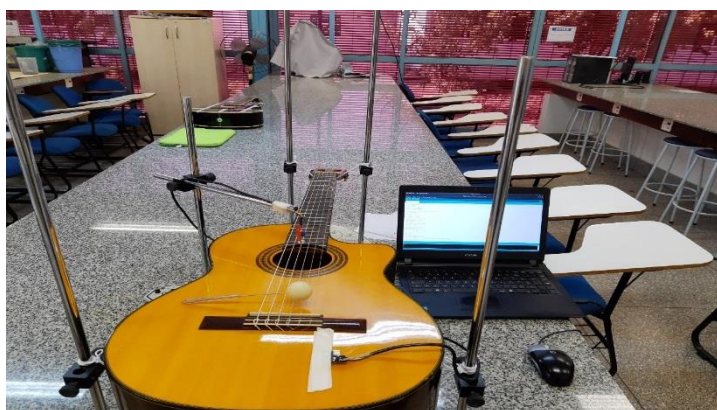


Figura 8: Violão profissional, com cordas de nylon



Figura 9: Violão padrão, com cordas de aço

Suporte “cama elástica”

Como pode ser observado nas Figuras 8 e 9, os violões foram colocados sobre um suporte improvisado com elásticos e tripés metálicos. As cordas eram tocadas com o martelo percussivo do kit diapasão. O modelo de suporte adotado foi baseado nos estudos de Dan Russel (1998) sobre os modos de vibração de guitarras e violões. O objetivo do suporte e a posição foi para que evitasse interferências externas nas vibrações do tampo.

2.2 Método

Inicialmente foi realizada uma pesquisa bibliográfica sobre a tecnologia de arduinos em revistas de ensino de ciências e outros artigos buscando aplicações na produção de diversos dispositivos para medição de grandezas físicas como a aceleração gravitacional e frequência de ondas.

Paralelo às pesquisas sobre a tecnologia de arduinos, foi realizado um treinamento para o uso prático do arduino por meio da disciplina Simulação no Ensino de Física, ofertada no segundo semestre de 2018, que contribuiu para o aperfeiçoamento prático no uso da placa microcontroladora.

Em seguida, foi realizada uma avaliação experimental dos sensores de som e vibração disponíveis no mercado e com isso, foram feitos testes experimentais com os sensores utilizando como fonte de sinais, o celular através do aplicativo, kit diapasão 440Hz e o violão profissional (Figura 8).

Para o estudo de caso dos violões inicialmente utilizamos o violão profissional (Figura

8) medindo as frequências de som e vibração de duas cordas fixando o sensor de vibração em um ponto do tampo e em seguida, utilizamos uma corda do violão para avaliar as frequências de sons e vibrações em pontos diferentes do tampo do instrumento. Na segunda parte do estudo de caso, utilizamos dois violões, violão profissional (Figura 8) e o violão padrão (Figura 9). Nos dois violões, foram feitas as avaliações dos sinais sonoros e vibracionais no tampo dos dois instrumentos, e por fim comparamos as medidas e os espectros de som e vibração dos violões.

Os dados foram analisados e armazenados em planilhas do Microsoft Excel para gerar os gráficos de ondas e as tabelas das medidas, e em seguida comparamos as medidas realizadas pelo dispositivo com as medidas realizadas pelo software Audacity. Para calcular as frequências das medidas realizadas com os protótipos, utilizamos as Equações 1 e 2 e a Análise de Fourier no Microsoft Excel para obter os espectros de som e vibração.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Treinamento do uso prático do Arduino

Durante o treinamento do uso do arduino, como trabalho final da disciplina ofertada, Simulação no Ensino de Física, foi produzido um sensor de alerta para cegos e surdos, o que serviu como grande aprendizado para o desenvolvimento do presente trabalho.

3.2 Protótipo 1: Teste do sensor de som, Arduino UNO

Foram avaliados os sensores de som, microfone KY038 e o Módulo Sensor Som detector de voz. Nas medidas utilizamos o microfone KY038 pois o Módulo Sensor Som detector de voz, não nos dava valores que serviam para calcular as frequências. O sensor apenas indicava que havia som ou não pelo fato de possuir apenas o pino de saída digital.

A Figura 10 mostra a montagem do sensor para as medidas de som com o KY038 conectado ao computador e ao celular (fonte de sinais pelo aplicativo). A Figura 11 apresenta a conexão do Arduino UNO com o sensor KY038 através da conexão analógica. Para o desenvolvimento do trabalho, usamos a entrada analógica para a captação de dados do som, sendo assim, não utilizamos a entrada digital, pois ela apenas nos mostraria o sensor em 2 (dois) modos; ligado ou desligado.



Figura 10: Conexão do protótipo 1 ao computador captando sinais do celular

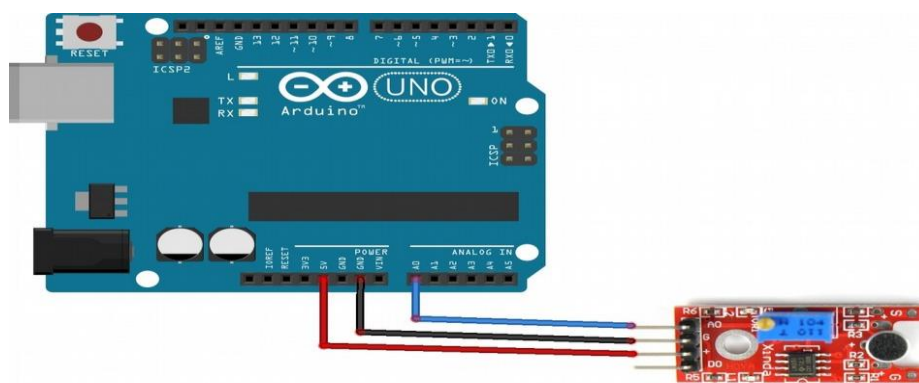


Figura 11: Conexão do Arduino UNO ao sensor KY038 através da pinagem analógica. Fonte: Arduino Learning

Nas medidas iniciais observamos diferenças significativas entre os valores da frequência do som harmônico produzido no aplicativo pelo celular e os medidos pelo sensor conectado ao Arduino. Verificamos que o aplicativo funcionava corretamente utilizando o software Audacity. Duas eram as causas dessas discrepâncias. O primeiro problema estava na escolha no dispositivo à saída das medidas de tempo e da amplitude do som realizadas pelo sensor. Inicialmente foi escolhida através do monitor do computador, a saída serial. Apesar da taxa de comunicação ser alta, 38400Hz, a escrita na tela causava um atraso significativo entre os dados captados pelo sensor e a impressão dos mesmos na tela serial do programa Arduino IDE, então modificamos o código para escrita na memória do dispositivo. Com a escrita na memória, os resultados mostraram-se precisos até frequências da ordem de 250 Hz.

A segunda discrepância tinha como causa a taxa de coleta do Arduino que limitava a coleta de frequências maiores que 250 Hz. Com o objetivo de ampliar a taxa de coleta do Arduino, tivemos que configurar o prescaler do Arduino para calcular frequências acima de

250Hz.

O Arduino UNO roda com um cristal de 16MHz. A frequência efetiva do clock depende de um fator denominado “prescaler” que varia de 2 a 128 (valor padrão que nesse caso, o prescaler = 128). O clock efetivo padrão é $16\text{MHz}/128 = 125\text{ kHz}$. Para uma conversão normal necessita de 13 pulsos de clock no conversor A/D, assim o clock de 125kHz deve ser dividido por 13 para expressar a taxa de amostragem do dispositivo corretamente que no caso é de $125\text{kHz}/13 \approx 9600\text{Hz}$. Na prática a conversão ocorre a 8600Hz (Embarcados, 2014).

Embarcados (2014) mostra como alterar o “prescaler” de modo a aumentar a taxa de amostragem com a modificação do valor da variável ADCSRA. Escolhemos o valor recomendado de 32 para o “prescaler”. Com esse valor foram realizadas medidas de som com frequências de até 16kHz. Uma observação importante é que a variável tempo deve ser do tipo “long” aferida através do comando “micros”, tempo em microssegundos, 10^{-6} s .

Uma observação importante deve ser realizada em relação a taxa de amostragem que não é exatamente o limite de frequência que pode ser medida pelo dispositivo.

Para que a amostra coletada tenha toda a informação da onda, conforme o teorema de Nyquist, temos de ter pelo menos dois pontos representando cada período da onda, em outras palavras, a taxa de amostragem do dispositivo dividida por 2 (dois) mostra a frequência máxima que o dispositivo pode coletar (Programar, 2009). Por exemplo, para uma taxa de amostragem de 1000Hz, 500Hz é o limite. A prática nos mostrou que um valor próximo a 5 é mais desejável, pois conduz a valores mais precisos da frequência e maior precisão também nos espectros de frequência determinados a partir da Transformada de Fourier e mesmo os gráficos Amplitude versus tempo ficam mais claros. Para ondas harmônicas mais complexas, 10 pontos por período é mais desejável para frequências mais baixas na ordem de 82 Hz.

No modo padrão com taxa de 8600Hz, a análise de sinais se torna limitada com frequências de aproximadamente 100Hz. Com prescaler 32 temos $16\text{MHz}/32 = 500\text{kHz}$. O oscilador do aplicativo que foi utilizado nas medidas de som do protótipo 1 produziu ondas harmônicas na ordem de 500Hz a 16kHz. Com o Arduino UNO ajustado com prescaler 32, foi possível medir ondas nessa faixa com margem de erros menores.

Apesar do sensor ter realizado medidas com precisão adequada, a memória de 2kb do Arduino UNO limitava a coleta de 512 pontos em cada medida, dificultando, em especial, a precisão dos espectros com a Transformada de Fourier. A solução foi trocar a placa UNO para a placa Arduino DUE com memória de 32kb. Outra vantagem do Arduino DUE, é a taxa de

amostragem de 72kHz para medidas simultâneas de som e tempo, permitindo a análise de espectro audível de 20Hz a 20kHz.

Resultados das medidas realizadas pelo protótipo 1

A Tabela 1 mostra os resultados das medidas de sons produzidos pelo aplicativo, onde foi utilizado o protótipo 1 e o gravador Audacity para comparar os resultados.

Tabela 1: Resultada das medidas feita pelo protótipo 1:

Frequências Fonte: Aplicativo (Hz)	Frequência medida pelo Audacity (Hz)	Frequência medida pelo Protótipo 1 (Hz)	Protótipo: Discrepância (%)
500	499	501	0,4
2000	2001	2003	0,01
8000	8000	8012	0,15
16000	15999	16025	0,16

Os resultados apresentaram boa precisão, com discrepâncias menores que 1% em uma análise de sinal sonoro construído a partir de uma amostra de 512 medidas feita pelo protótipo 1.

3.3 Protótipo 2: Teste do sensor de som, Arduino DUE

A Figura 12, apresenta a montagem com o Arduino DUE. A taxa de amostragem padrão para o Arduino DUE é de 72kHz, permitindo assim medidas de frequência com precisão para ondas harmônicas de 14kHz. Agora podemos armazenar mais de 4000 pontos em cada medida. Nas medidas de baixa frequência acrescentamos um delay entre as medidas, de modo a aumentar o número de períodos nas ondas, possibilitando uma melhor análise.

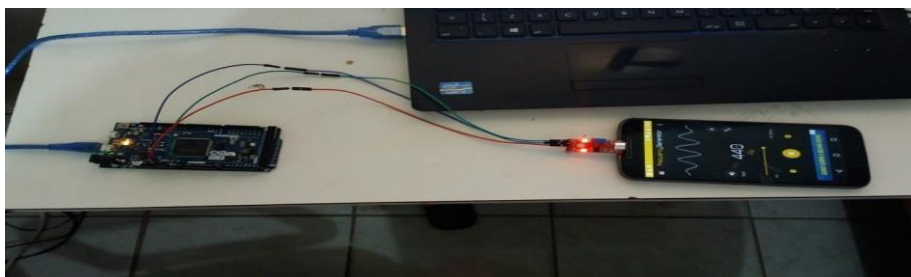


Figura 12: Conexão do sensor KY038 a entrada analógica do Arduino DUE conectado via USB ao computador

Nos resultados apresentados abaixo, as frequências foram determinadas utilizando as

Equações 1 e 2 considerando uma média de 10 períodos das ondas produzidas. Todos os gráficos apresentados nos resultados foram suavizados para uma melhor visualização e para facilitação dos cálculos através das Equações 1 e 2.

A Figura 13 apresenta a medida do som produzido no diapasão de 440Hz. Conseguimos chegar em um valor aproximado de 437Hz, portanto adquirindo um erro percentual de 0,7%.

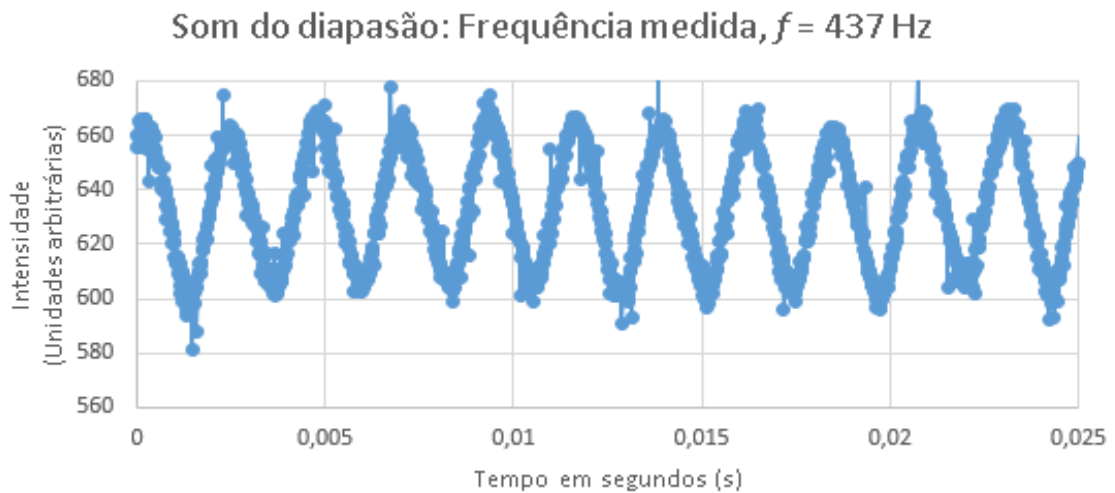


Figura 13: Frequência emitida pelo diapasão de 440Hz. A frequência medida pelo protótipo foi de 437Hz

Na Figura 14 é mostrada a medida de som feita pelo protótipo 2 no oscilador do aplicativo. O valor emitido pelo aplicativo foi de 2,4599kHz e medida do protótipo 2 foi de 2,45kHz com erro percentual de 0,5 %.

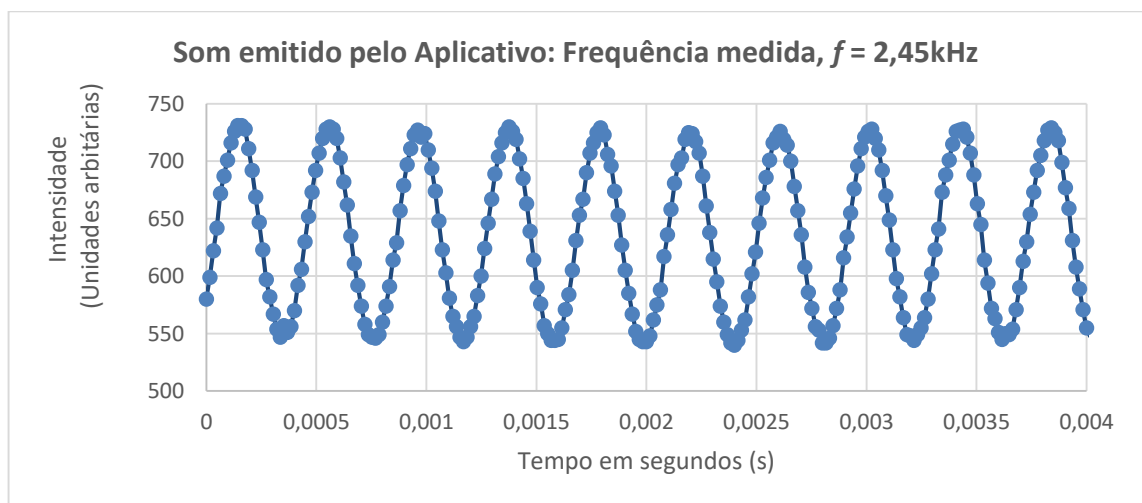


Figura 14: Frequência emitida pelo aplicativo. A frequência medida pelo protótipo foi de 2,45kHz

Na Figura 15 é mostrado a medida realizada no oscilador do celular. O valor emitido pelo aplicativo foi de 8,00kHz e a medida de 8,01kHz com erro percentual de 0,2%.

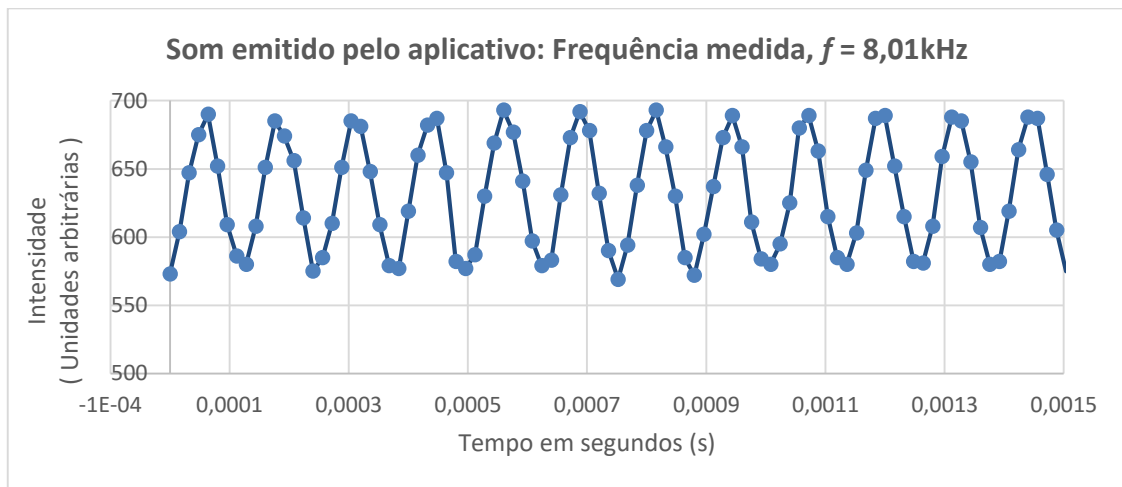


Figura 15: Frequência emitida pelo aplicativo. A frequência medida pelo protótipo foi de 8,01kHz

Como pode ser observado nas Figuras 13,14 e 15, a taxa de amostragem é de 72kHz, observa-se que o número de pontos por período das ondas varia entre os gráficos, sendo na Figura 15 de aproximadamente 9 pontos por período. Assim a frequência não pode aumentar muito além de 16kHz, onde a estimativa é de 5 pontos por período para taxa de amostragem de 72kHz, o que impede a reprodução da onda com fidelidade.

3.4 Protótipo 3: Estudo de caso, etapa 1; Violão Profissional

Iniciamos as medidas de vibração testando dois sensores de vibração disponíveis no mercado, o SW18010P e o 2578AY-RG. Após vários testes concluímos que esses sensores não são capazes de descrever a variação da intensidade da vibração com o tempo, mas apenas aferir se existe ou não vibração. Após a pesquisa das possibilidades disponíveis optamos pelo acelerômetro MPU6050 como sensor de vibrações. O MPU6050 foi utilizado devido a sua capacidade de sensibilidade a variações de rotação, batidas e vibrações. A análise realizada foi restrita a componente z da aceleração perpendicular à superfície.

Depois de vários testes, foi observado que a medida simultânea de som, vibração e tempo reduz a taxa de amostragem do Arduino DUE para 2000 Hz, limitando a frequência máxima do sinal de aproximadamente 500Hz.

A Figura 16 apresenta a montagem para realização das medidas de vibração e de som. Como é observado na imagem abaixo, as primeiras medidas com os sensores de som e de

vibração ligados simultaneamente foram feitas no tampo superior do violão profissional. O microfone fixo próximo a boca do instrumento e o sensor de vibração próximo ao cavalete (onde as cordas do violão estão amarradas na peça retangular).



Figura 16: Sensores de som e de vibração ligados ao Arduino DUE medindo as oscilações no tampo superior do violão Profissional

No teste do protótipo 3 foram analisados o som e a vibração da corda Mi (6ª corda) (corda mais grave do violão) e a corda Sol (3ª corda) do violão profissional. O valor padrão da corda Mi (6ª corda) é 82Hz para um violão afinado e da corda Sol (3ª corda) é 196 Hz segundo Marcio Nigro (2018). O Audacity foi utilizado como referência para validação dos dados medidos pelo dispositivo. Os valores de frequência foram determinados a partir das Equações (1) e (2) e pela Transformada de Fourier.

As Figuras 17 e 18 apresentam uma janela de 0,05s das leituras de som e vibração. Observa-se que as ondas são compostas por vários harmônicos, como mostram os espectros apresentados nas Figuras 19 e 20. Por outro lado, são ondas com frequência próxima.

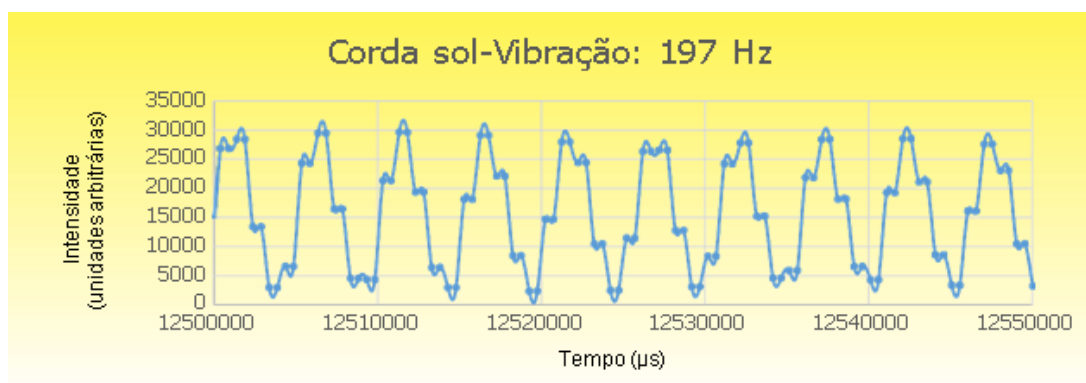


Figura 17: Medida de vibração na corda Sol. O período de tempo é 0,00508 s.

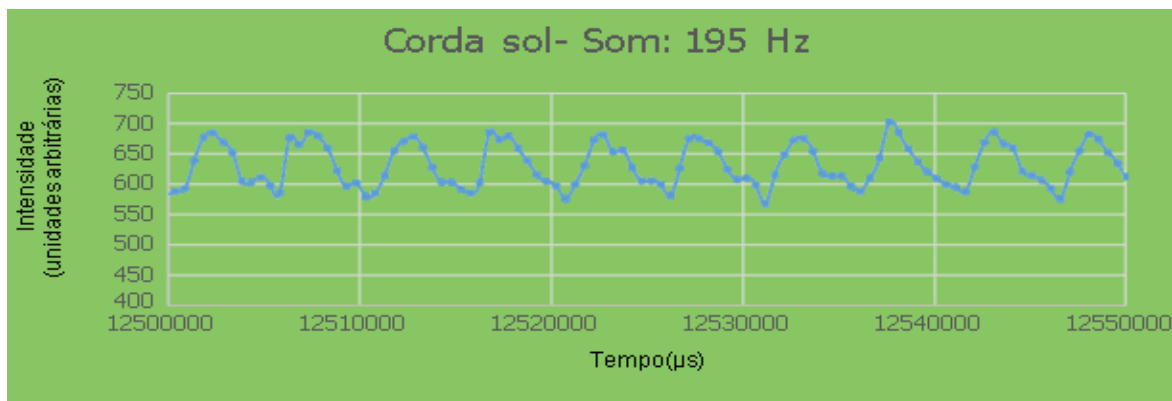


Figura 18: Medida de som na corda Sol. O período de tempo é 0,00513 s.

A falta de regularidade das ondas mostradas nas Figuras 18 e 19 deve-se ao fato da taxa de amostragem ser de 2kHz, assim apenas 10 períodos e uma média de 10 pontos por período são utilizados no gráfico.

A Transformada de Fourier dos sinais é apresentada em parte nas Figuras 19 e 20. As frequências são precisamente iguais. Observa-se nos gráficos outros modos de vibração da onda. O cálculo ocorreu a partir de uma amostra de 4096 pontos.

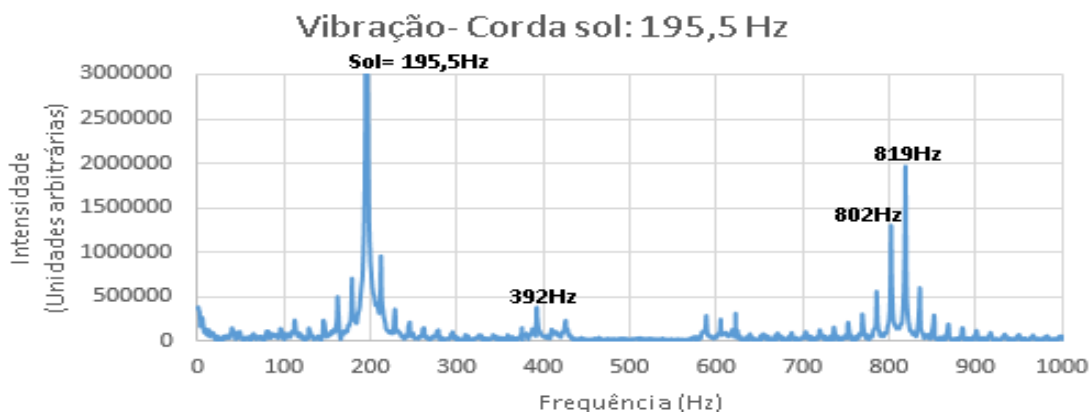


Figura 19: Frequência de vibração obtida pela Transformada de Fourier. Pico de frequência no valor de 195,5 Hz

No espectro de vibração (Figura 19), é possível observar que há mais harmônicos quando comparado ao espectro de som (Figura 20), o que caracteriza o sinal sonoro ser mais puro e límpido.

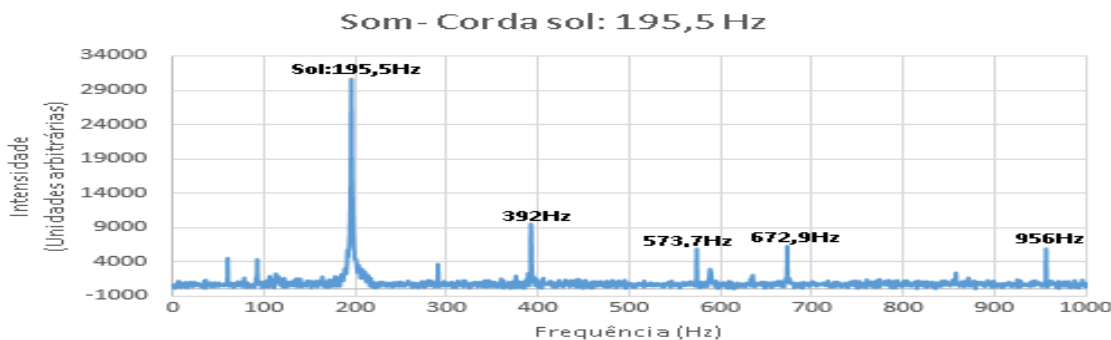


Figura 20: Frequência de som obtida pela Transformada de Fourier. Pico de frequência no valor de 195,5 Hz.

Tabela 2: Medidas realizadas nas cordas Mi (6ª corda) e Sol (3ª corda)

Cordas Soltas	Frequência padrão das cordas	Frequência do Som medida pelo Dispositivo	Frequência da Vibração medida pelo Dispositivo	Discrepância nas Medidas do Dispositivo (%)	Frequência Medida Pelo Audacity (Hz)	Discrepância nas medidas do Audacity (%)
Mi (6)	82 Hz	82 Hz	82 Hz	0	82	0
Sol (3)	196 Hz	195,5 Hz	195,5 Hz	0,3	196	0
Cordas 12ª casa	Frequência Padrão das cordas	Frequência do Som medida pelo Dispositivo	Frequência da Vibração medida pelo Dispositivo	Discrepância nas Medidas do Dispositivo (%)	Frequência Medida Pelo Audacity (Hz)	Discrepância nas medidas do Audacity (%)
Mi (6)	164 Hz	164 Hz	164 Hz	0	164 Hz	0
Sol (3)	392 Hz	403 Hz	403 Hz	3	399 Hz	2

Os valores das medidas feita pelo protótipo 3 apresentaram discrepâncias menores ou iguais a 3%. Enquanto que os resultados das medidas feita pelo Audacity foram menores ou iguais a 2%. Portanto, os dois medidores de frequência tiveram precisões de medidas próximas, considerando que o protótipo produzido apresenta uma taxa de amostragem na ordem de 2kHz e enquanto que o Audacity apresenta uma taxa de coleta no valor de 96kHz.

Como é observado na Tabela 2, as medidas nas cordas ocorreram primeiramente sendo tocadas soltas e em seguida pressionadas na décima segunda casa do braço do violão.

Em uma segunda etapa das medições no violão profissional, a posição do sensor de vibração foi variada sobre tampo do violão e enquanto que o microfone ficou fixo próximo a boca do violão. O sensor foi fixado primeiramente no tampo superior (frente do violão) e em seguida no tampo inferior (verso do violão).

Foram avaliados o som e a vibração da corda lá (5ª corda) do violão, segunda corda mais grave do instrumento. Após a realização das medidas notamos que as vibrações na madeira do instrumento e as ondas sonoras podem ficar em fase ou em oposição de fase, caracterizando

a existência de ondas estacionárias dentro do violão. A Figura 21 mostra a concordância de fase entre as ondas sonoras e vibracionais no tampo superior do violão profissional e enquanto que na Figura 22 apresenta a oposição de fase entre as duas ondas.

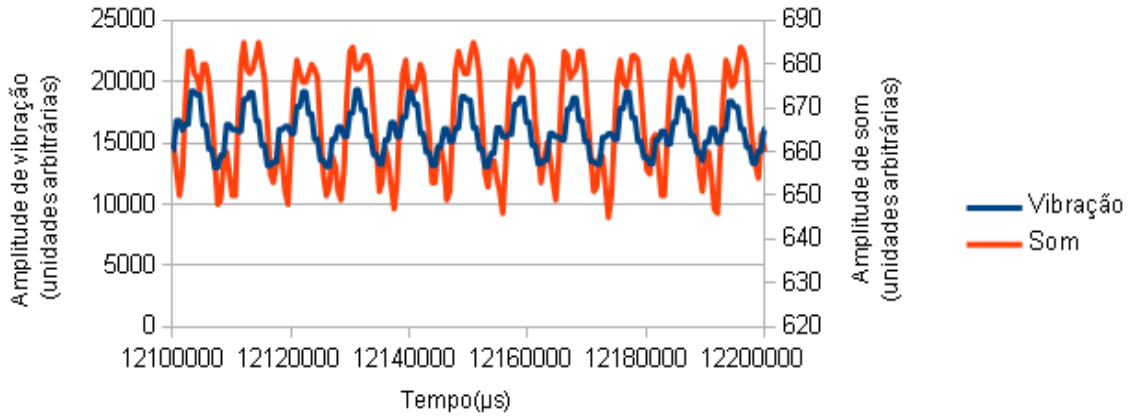


Figura 21: Ondas sonoras e vibracionais em fase no tampo superior do violão profissional. Frequência na corda lá de 110 Hz

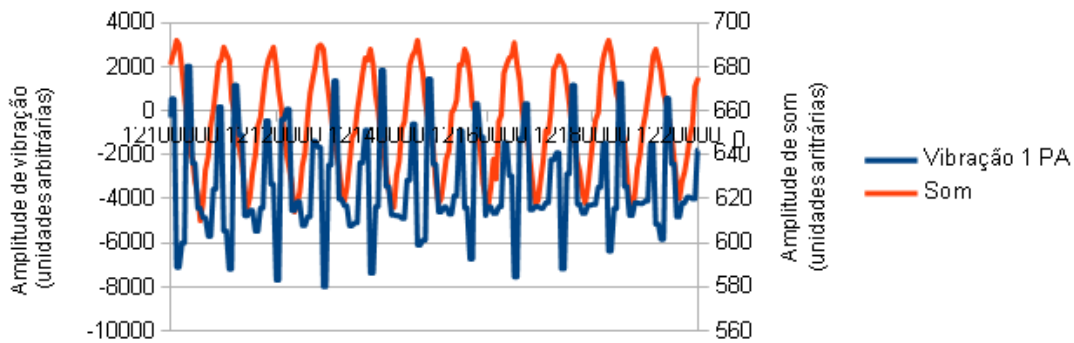


Figura 22: Ondas sonoras e vibracionais em discordância de fase no tampo inferior do violão profissional. Frequência na corda lá de 110Hz

Além das diferenças de fase entre as duas ondas (som e vibração), foi calculada a partir das Equações 1 e 2, a frequência da corda Lá (5ª corda) no valor de 110Hz que corresponde ao valor padrão da corda, segundo Marcio Nigro (2018).

3.5 Comparação entre dois violões: Violão Profissional versus Violão Padrão

Após as medidas iniciais no violão profissional, a segunda etapa dá-se com o uso do violão padrão junto ao profissional para a conclusão das medidas finais.

Os violões foram colocados sobre uma “cama” de elásticos amarrados nas barras fixadas a borda da mesa com apoio de tripés conforme é visualizado nas Figuras 8 e 9 destacadas nos Materiais, sessão 2.1.

No violão padrão (Figura 9), os microfones KY038 do dispositivo e o microfone do fone de ouvido eram pendurados com apoio das barras metálicas próximos a boca do violão. O sensor KY038, coletava os dados sonoros para o dispositivo e o microfone do fone gravava o som produzido pelo violão padrão para o programa Audacity.

Dois computadores estavam sendo utilizados, um para armazenar os dados do violão padrão (Figura 9) para o Arduino e outro para o Audacity. O mesmo procedimento foi realizado para o violão profissional, porém sem o Audacity. Após as coletas de dados dos dois violões, a etapa seguinte foi analisar e comparar os violões e os espectros sonoros e vibracionais.

As medidas foram organizadas nas seguintes etapas; na primeira etapa, foram captadas as frequências do som das cordas e das vibrações no tampo dos violões com o sensor de vibração fixo em um ponto, na segunda etapa, foram medidos os modos de vibração em pontos diferentes do tampo do violão padrão e em seguida foi verificada se há concordância ou oposição de fases entre as vibrações e as ondas sonoras, e por fim, comparar as medidas realizadas nos dois violões.

Medidas de som e vibração nas cordas dos violões Profissional e Padrão

Tabela 3: Cordas dos violões

Cordas	Frequência padrão das cordas (Hz)	Som Violão profissional (Hz)	Vibração Violão profissional (Hz)	Discrepância Violão profissional (%)	Som Violão padrão (Hz)	Vibração Violão padrão (Hz)	Discrepância Violão Padrão (%)	Audacity (Hz)
Mi(1) mais aguda	330	330	330	1,7	345	345	3	336
Si (2)	247	248	248	3	326	326	36	240
Sol (3)	196	192	192	0,5	186	186	3,6	193
Ré (4)	146	126	126	13	144	144	0,7	145
Lá (5)	110	110	110	0	106	106	3,6	110
Mi (6) mais grave	82	82	82	0	80	80	2,5	82

Os resultados mostraram diferenças significativas entre os dois violões. Como é mostrado na Tabela 3, o violão profissional teve discrepâncias menores quando comparado com o violão padrão. O violão profissional teve erros percentuais menores ou iguais a 13 %. Enquanto o violão padrão teve erros percentuais menores ou iguais a 36%.

Verificamos que o violão padrão estava com as cordas desgastadas e com braço empenado, o que causou as desafinações nas cordas que provavelmente influenciou nos resultados das medidas. “Cordas velhas e avarias no instrumento, como braço empenado e rachaduras, são fatores que também podem desequilibrar a afinação do seu instrumento “ (Waldman Music, 2015). Vimos também, que a corda ré do violão profissional teve um erro significativo de 13 % que provavelmente foi em decorrência da desafinação. Instrumentos com cordas tensionadas por tarraxas como o violão tem a forte tendência de mudar o seu padrão de afinação para outras maiores ou menores. Como destaca Marcio Nigro (2018), instrumentos de cordas com tarraxas permitem tencionar determinada corda até que se atinja determinada tensão na corda, o que gera uma frequência específica.

Vibrações no tampo do violão Padrão

Outras medidas foram realizadas no violão padrão, variando a posição do sensor de vibração no tampo superior (parte da frente do violão) e inferior (parte de trás do violão) e o de som fixo próximo a boca do instrumento com o objetivo de estudar as vibrações na estrutura do violão e verificar se há concordância ou oposição de fases entre as ondas sonoras e as ondas vibracionais no tampo. Nessa etapa usamos a corda Lá do violão como frequência fixa, pois foi a que apresentou ondas menos complexas, tendo em vista que as ondas produzidas pelo violão não são tão harmônicas para as medições do dispositivo.

A Figura 23 mostra as ondas sonoras e vibracionais no tampo superior com o sensor de vibração localizado no violão padrão.

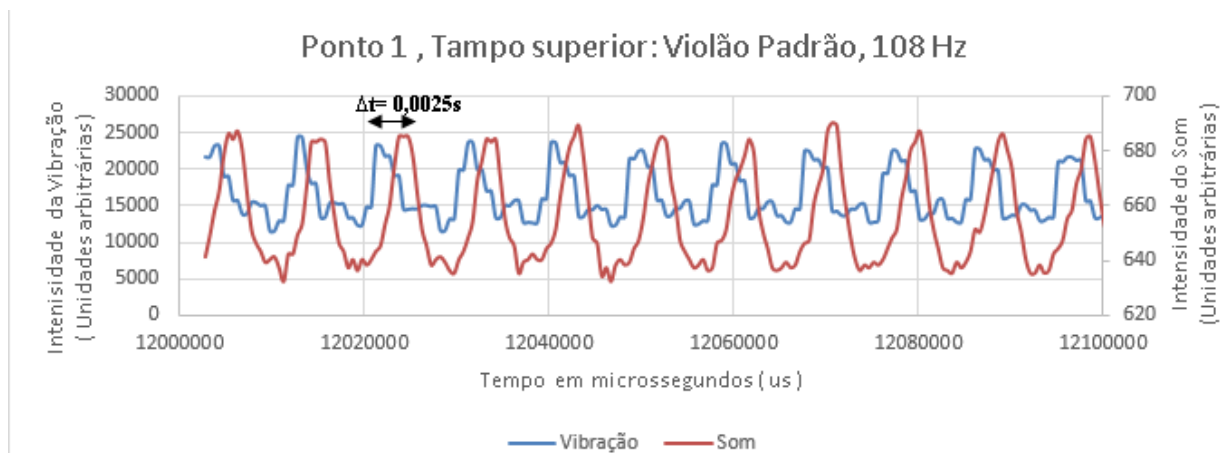


Figura 23: Ponto 1 do tampo superior do violão padrão, diferença de fase, $\Delta\Phi = \pi/2$

Tanto as frequências de vibração e som, chegaram ao mesmo valor de 108 Hz.

A Figura 24 mostra o mesmo fenômeno no ponto 2 do tempo superior. As frequências de vibração e som foram medidas no mesmo valor, 108 Hz.

Como é observado nas Figuras 23 e 24, as ondas apresentaram uma diferença de fase entre as ondas sonoras e as vibracionais. Essa diferença foi calculada pelo intervalo de tempo, $\Delta t = 0,0025$ s. O período de propagação das ondas é de $T = 0,009259$ s que corresponde a 2π . Então para calcular a diferença de fase, $\Delta\Phi$, entre as duas ondas divide 2π multiplicando Δt pelo período, T . Logo,

$$\Delta\Phi = 2\pi \times 0,0025 \text{ s} / 0,009259 \text{ s} = \pi/2 \quad (5)$$

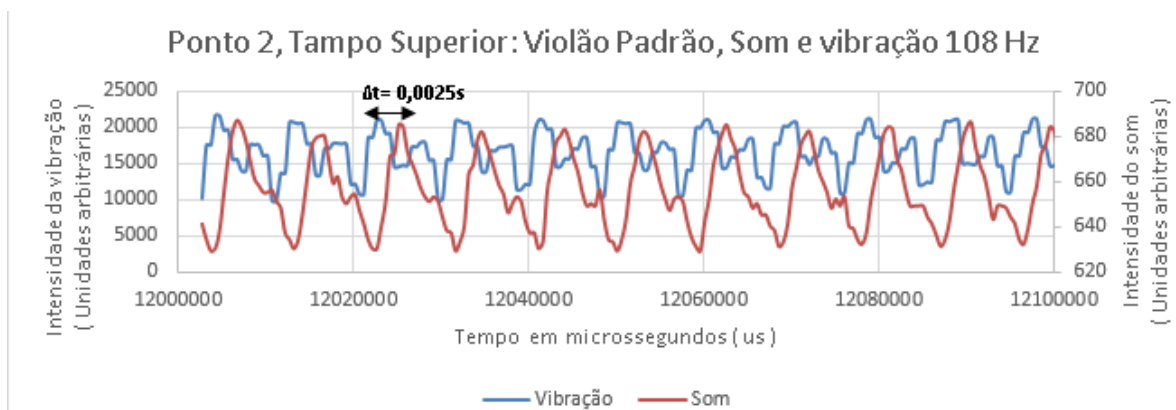


Figura 24: Ponto 2 do tempo superior do violão padrão, diferença de fase, $\Delta\Phi = \pi/2$

As figuras 27 e 28 mostram que em dois pontos do tempo inferior, as ondas de som e de vibração também apresentaram diferença de fase no valor de $\Delta\Phi = \pi/2$.

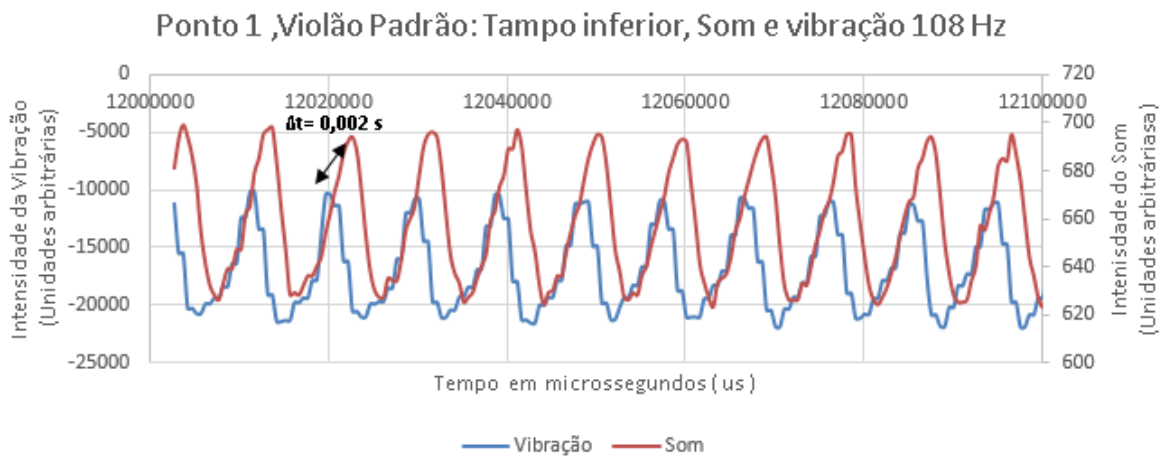


Figura 25: Ponto 1 do tempo inferior do violão padrão, diferença de fase, $\Delta\Phi = \pi/2$

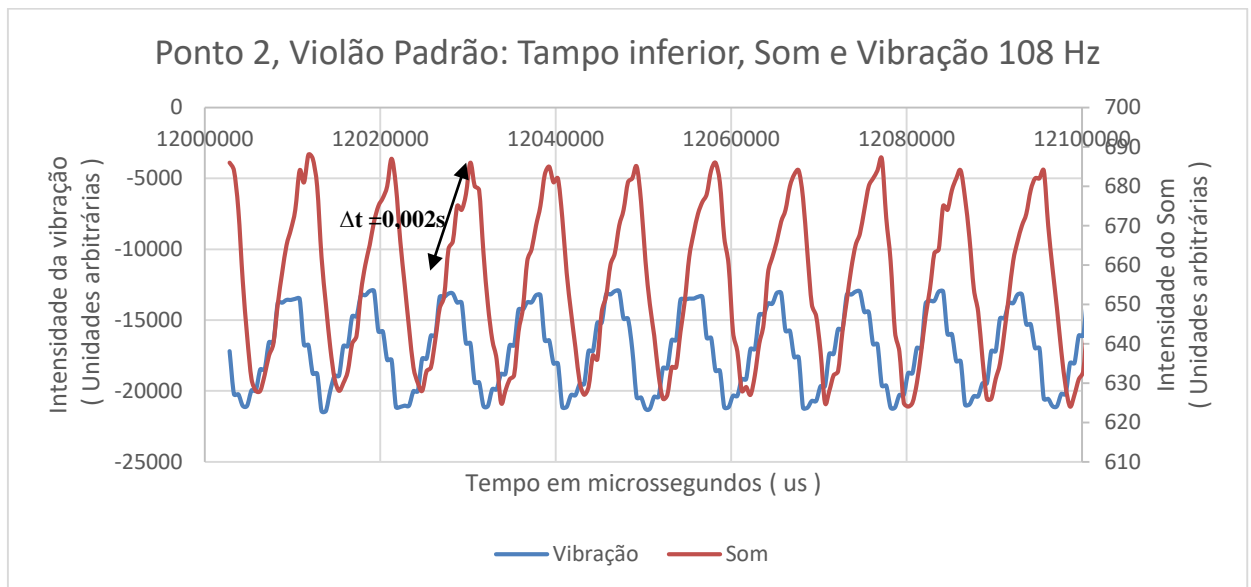


Figura 26: Ponto 2 do tempo inferior do violão padrão, diferença de fase, $\Delta\Phi = \pi/2$

Comparação dos espectros de som entre os violões: Corda Mi (6ª corda)

Os espectros foram produzidos a partir da Transformada de Fourier no Microsoft Excel nos dois violões. A Figura 27 mostra a comparação entre os dois espectros. Na figura é possível a observação de outros picos harmônicos. O pico de frequência entre os dois violões no primeiro harmônico foi precisamente igual, 80 Hz. A diferença entre os picos está na intensidade, como é observado na figura. Observa-se que no segundo pico a intensidade do violão padrão chega próximo de 1,00, enquanto que no violão profissional, na mesma frequência chega próximo de 0,700.

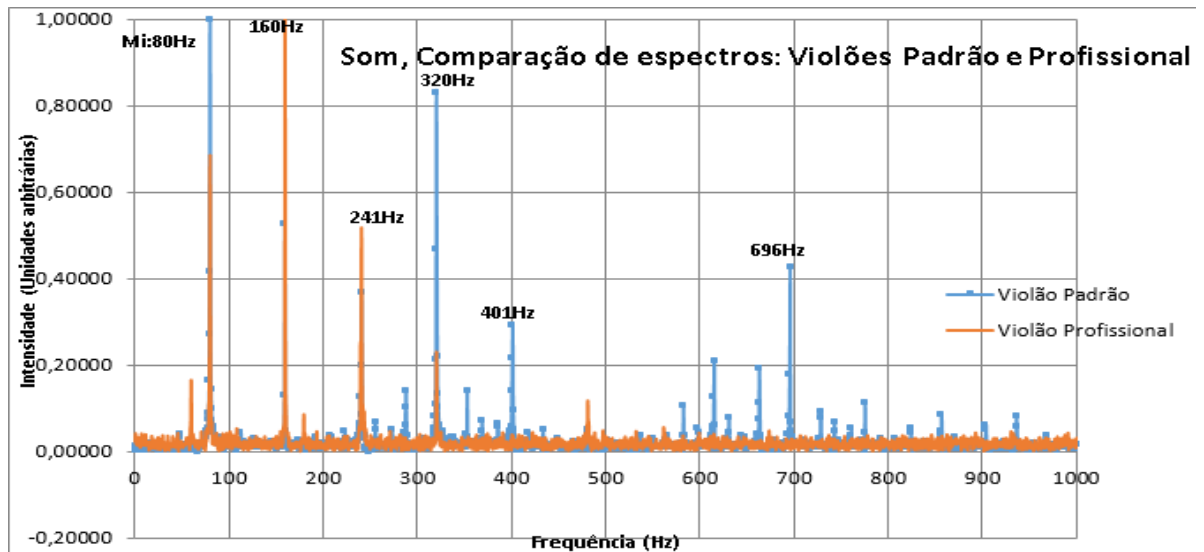


Figura 27: Comparação de espectros de som. Frequência medida, 80,07 Hz.

Comparação dos espectros de vibração entre os violões: Corda Mi (6ª corda)

Na Figura 28, é mostrado a comparação dos espectros de vibração entre os violões profissional e padrão. Os picos de frequências alcançados pelos violões tiveram uma diferença de cerca de 2Hz. O violão padrão chegou a um valor de 80Hz, próximo da frequência padrão que é de 82Hz segundo Marcio Nigro (2018). Já o violão profissional chegou a um valor mais próximo do padrão, com um valor de 82,03 Hz.

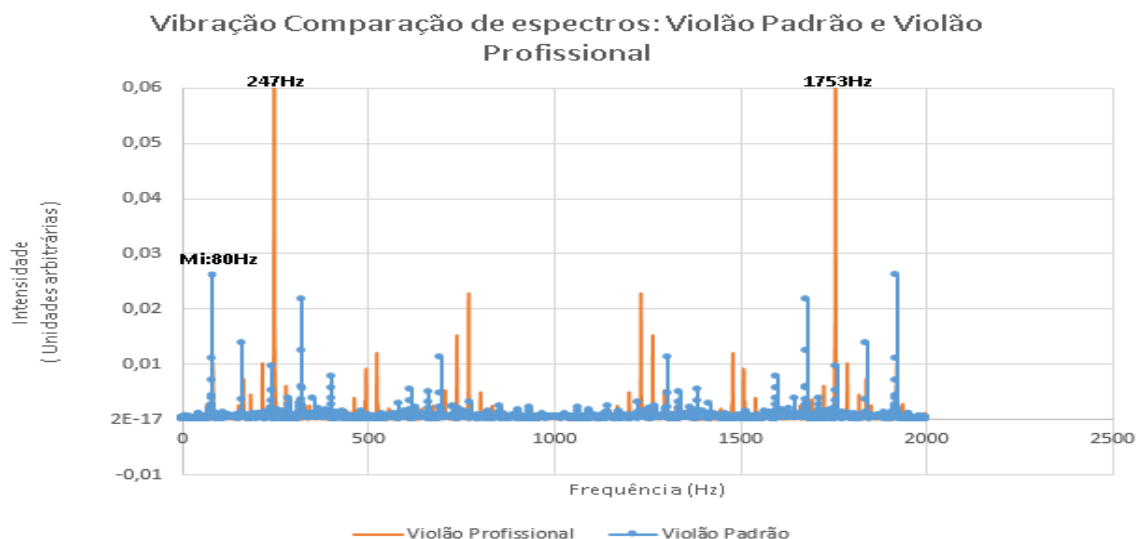


Figura 28: Comparação dos espectros de vibração entre os violões profissional e padrão

Os resultados do espectro de som realizado nos dois violões, nos mostrou que o violão profissional possui um som mais límpido e puro quando comparado ao violão padrão.

Comparação dos espectros de medidas: Sensor de som do dispositivo e o Audacity

A última etapa da análise dos dados, foi comparar os espectros de medidas do microfone do dispositivo com as medidas do Audacity realizadas no violão padrão. Como é mostrado na Figura 29, os picos de frequência dos dois medidores, estão quase que equivalentes em termos de frequência. No segundo harmônico, os picos de frequências tanto para o sensor quanto para o software foram próximos do resultado desejado, no valor de 79,05 Hz.

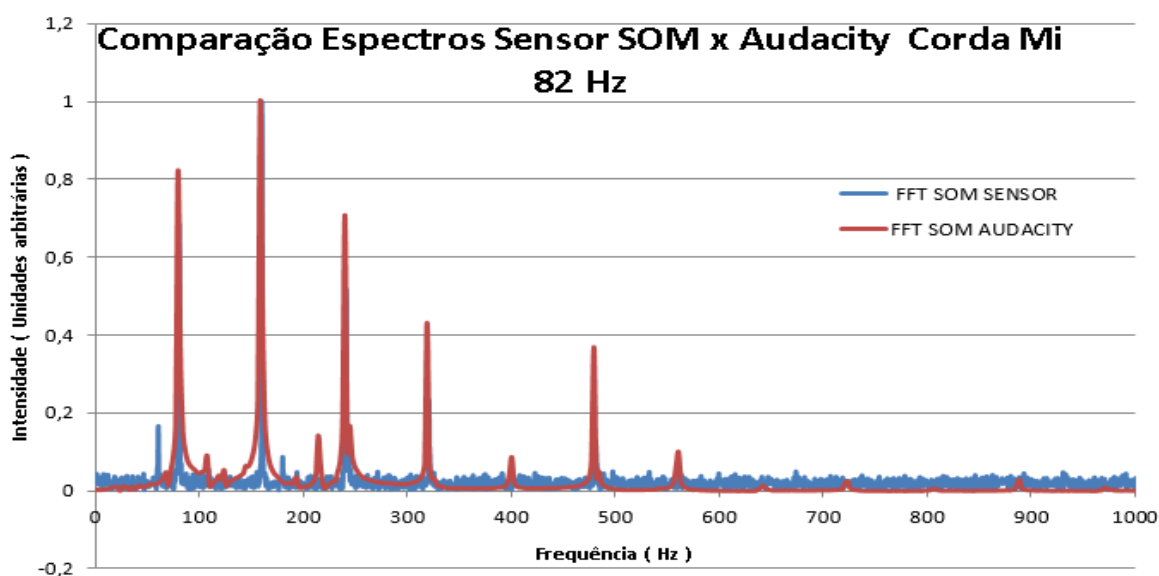


Figura 29: Comparação dos espectros de som entre o Sensor de Som e o Audacity

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A realização desse trabalho possibilitou obter resultados interessantes acerca dos estudos sobre as vibrações mecânicas e o som. Nos permitiu ter um olhar mais científico sobre como o som é emitido pelo violão e os seus efeitos vibracionais causados no instrumento. Não é apenas dizer que o som do violão é emitido só pelo fato de tocar uma corda, essa análise mostra que isso vai além do que um simples toque nas cordas. A madeira do instrumento e a qualidade das cordas influenciam no som do violão. Por fim, há todo um processo complexo envolvido na emissão do som.

Outro ponto importante, foi o uso prático do protótipo criado. Durante o período de testes e produção do dispositivo, o autor do presente trabalho utilizou o sensor de som como recurso didático nas aulas sobre ondulatória e som em atividades de estágio da faculdade, o que

serviu de bastante aprendizado para os alunos do 9º ano do ensino fundamental. Tecnologias como essa permitem produzir otimizações de baixo custo para estudos experimentais em diversas áreas da ciência.

No segundo semestre de 2018, o autor desse trabalho cursou uma disciplina chamada Simulação no Ensino de Física que oferece conhecimentos gerais sobre o Arduino e o básico sobre a linguagem de programação em C. As aulas dessa disciplina foram de fundamental importância, pois serviram como base para a realização desse trabalho. No trabalho final da disciplina foi construído um protótipo de sensor de alerta para cegos e surdos com resultados satisfatórios na sua funcionalidade.

A produção desse protótipo de sensor de som e vibração serviu como grande aprendizado acerca do trabalho científico e abre novas possibilidades de melhoria para o sensor e aplicação para estudos mais avançados acerca do som e das vibrações mecânicas em geral.

REFERÊNCIAS:

ALMEIDA,T. Arduino: primeiros passos. Disponível em <<https://arduinoopilab.wordpress.com/2017/03/28/arduino-primeiros-passos/>>, acesso em 24/11/2019

Arduino Learning. KY038 Microphone Module and Arduino example. 2019. Disponível em <<http://arduinolearning.com/code/ky038-microphone-module-and-arduino-example.php>> , acesso em 18/11/2019.

Aruido Referências. Bibliotecas de fios. Arduino, 2019. Disponível em: <<https://www.arduino.cc/en/reference/wire>> , acesso em: 18/11/2019.

Arduino Paraná. DUE. 2019. Disponível em <<http://arduinoparana.blogspot.com/p/duet.htm>> , acesso em 16/11/2019.

Audacity. Free, open source, cross-platform audio software. 2019. Disponível em <<https://www.audacityteam.org/>> , acesso em 18/11/2019.

BISTAFA, S. Acústica aplicada ao controle do ruído 2a edição. Brasil, Blucher, 2011, p 1-384.

CORDOVA,H; TORT, A. Medida de g com a placa Arduino em um experimento simples de queda livre. Rio de Janeiro, Brasil, Revista Brasileira de Ensino de Física. 2015, p 1- 5.

COSTA; GOMES. Transformada de Fourier uso do Microsoft Excel para processamento de sinais. Brasil, Instituto Federal do Paraná, 2017, p1-15.

DENIS. Música: Ondas Mecânicas que se transformam em Arte. 2019. Disponível em

<<https://blog.biologiatotal.com.br/musica-ondas-mecanicas>> , acesso em 16/11/2019.

HALLIDAY; RESNICK; WALKER. Fundamentos de Física, volume 2: gravitação, ondas e termodinâmica. Rio de Janeiro, Brasil, LTC,2009, p 1- 295.

HALLIDAY; RESNICK; WALKER. Fundamentos de Física, volume 2: gravitação, ondas e termodinâmica. Rio de Janeiro, Brasil, LTC,1996, p 1- 295.

HEWITT, P. 11a edição Física Conceitual. São Paulo, Brasil, Bookman, 2011, p 1- 744.

NIGRO,M. O “mistério” das afinações alteradas. 2018. Disponível em <<http://www.marcionigro.com.br/buraconigro/afinacoes/>> , acesso em 16/11/2019.

RAMALHO;NICOLAU;TOLEDO. Os fundamentos da Física 2. São Paulo, Brasil, Moderna, 2012, p1-532.

RAMOS,J;ABREU,P. Metaprogramação em C++. Portugal, Programar, 2009 p 1-27.

RUSSEL,D. Modal Analysis of an Acoustic Folk Guitar. Universidade de Kettering, EUA, 1998. Disponível em <<https://www.acs.psu.edu/drussell/guitars/hummingbird.html>> , acesso em 18/11/2019.

SILVEIRA, S ; GERARDI,M. Desenvolvimento de um kit experimental com Arduino para o ensino de Física Moderna no Ensino Médio. Universidade Federal de Santa Catarina, Araranguá, SC, Brasil, Revista Brasileira de Ensino de Física, 2017. p 1-7.

SOUZA,F. Arduino UNO- Taxa de amostragem do conversor A/D. Embarcados , 2014. Disponível em <<https://www.embarcados.com.br/arduino-taxa-de-amostragem-conversor-ad/>>, acesso em 14/07/2019.

SOUZA,A; PAIXÃO,A; UZÊDA,D; DIAS,M; DUARTE,S; AMORIM,H.A placa Arduino uma opção de baixo custo para experiências de física assistidas pelo PC. Instituto de Física, UFRJ, Rio de Janeiro, Brasil, Revista Brasileira de Ensino de Física , 2011. p 1- 5.

Walman Music. Porque o Violão/Guitarra Desafina? 2015. Disponível em <<http://www.waldman-music.com/blog/voce-sabia-porque-o-violaoguitarra-desafina/>>, acesso em 16/11/2019.

ANEXOS

Anexo A- Códigos da programação utilizados no programa Arduino IDE

```
teste-sensorvib2
#include <Wire.h>
int intensidade[4096];
int tempo[4096],ii;

//Endereco I2C do MPU6050
const int sensor=0x68;

//Variaveis para armazenar valores dos sensores
int16_t AcZ[4096];

void setup()
{
  Serial.begin(38400);
  Serial.println("atencao");
  delay(10000);
  Serial.println("tocar");
  delay(2000);
  Wire.begin();
  Wire.beginTransmission(0x68);
  Wire.write(0x6B);

  //Inicializa o MPU-6050
  Wire.write(0);
  Wire.endTransmission(true);
}

void loop()
{
  for(ii=0;ii<4095;ii++){
    Wire.beginTransmission(0x68);
    Wire.write(0x3F); // starting with register 0x3B (ACCEL_XOUT_H)
    Wire.endTransmission(false);
```

```
teste-sensorvib2
}

void loop()
{
  for(ii=0;ii<4095;ii++){
    Wire.beginTransmission(0x68);
    Wire.write(0x3F); // starting with register 0x3B (ACCEL_XOUT_H)
    Wire.endTransmission(false);

    //Solicita os dados do sensor
    Wire.requestFrom(0x68,2,true);

    AcZ[ii]=Wire.read()<<8|Wire.read(); //0x3F (ACCEL_ZOUT_H) & 0x40 (ACCEL_ZOUT_L)
    intensidade[ii]=analogRead(0);
    tempo[ii]=micros();

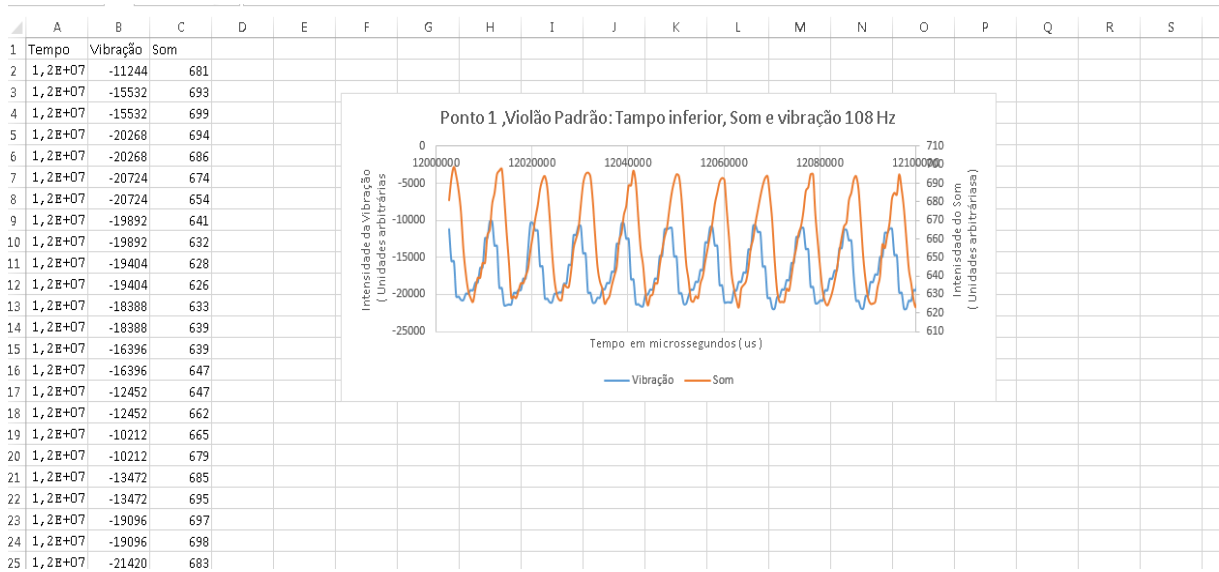
  }

  for(ii=0;ii<4095;ii++){
    Serial.print(tempo[ii]);
    Serial.print(" ");
    Serial.print(AcZ[ii]);
    Serial.print(" ");
    Serial.println(intensidade[ii]);

  }

  Serial.println("para a leitura ");
  delay(10000);
  Serial.println("tocar");
  delay(2000);
}
```

Anexo B- Dados do arduino armazenados na planilha do Excel e a plotagem do gráfico das ondas de som e vibração



Anexo C- Análise de Fourier realizada nos dados armazenados na planilha do Excel para gerar o gráfico do espectro

