



.....
Nicolas Neves de Oliveira^{1#} , João Basso Marques¹, Leone Francisco Amorim Curado¹,
Lucas Cardoso Ramos¹

¹Instituto de Física, Universidade Federal de Mato Grosso, Cuiabá, MT, Brasil.
.....

Palavras-chave

ondas estacionárias
instrumento musical
aplicativo
autocorrelação

Resumo

Facilitar o entendimento da física tem sido um desafio constante ao longo do tempo, exigindo cada vez mais a busca por maneiras de tornar o aprendizado de física mais acessível. Neste trabalho, nosso objetivo é demonstrar a física teórica e experimental das ondas estacionárias. Para isso, utilizamos uma abordagem inovadora que combinou um instrumento musical amplamente conhecido, o violão, com o aplicativo PhyPhox, que permite a realização de experimentos de física por meio dos sensores presentes em smartphones. Realizando o experimento de autocorrelação de áudio disponível no aplicativo, os resultados obtidos mostraram-se satisfatórios, com as frequências medidas para cada nota muito próximas das esperadas em uma escala temperada. A análise dessas frequências possibilitou o cálculo da velocidade de propagação das ondas nas cordas do violão, um valor relevante que está diretamente relacionado à tensão e à densidade linear de cada corda. Observou-se que as cordas mais grossas geram sons mais graves devido à menor velocidade de propagação, enquanto as cordas mais finas produzem sons mais agudos. Além disso, as variações nas intensidades dos picos de autocorrelação sugerem flutuações no som, refletindo o comportamento realista de atenuação do som ao longo do tempo.

1. Introdução

Quando um trovão é gerado pelo processo físico de vibração, ocorre o mesmo fenômeno de oscilação observado ao se deslizar o dedo umedecido na borda de uma taça de cristal ou ao vibrar uma corda de violão. Todos os instrumentos musicais produzem oscilações e ondas que podem ser associados a fenômenos físicos [1]. Essas vibrações podem ser descritas matematicamente por meio de diferentes séries harmônicas. A teoria que descreve as caracterís-

ticas do som produzido por diversas fontes pode ser matematicamente complexa. No entanto, é possível utilizar aproximações para transmitir as ideias fundamentais da geração de sons, como feito em outros trabalhos que abordam a física de instrumentos com cordas vibrantes [2].

Pode-se afirmar que a música é uma presença constante na vida diária de muitas pessoas, desde a infância até a vida adulta. Embora nem todos percebam, a área do som é fascinante, envolvendo fenômenos físicos, biológicos, artísticos

#Autor de correspondência. E-mail: nicolas.oliveira@fisica.ufmt.br.

Este é um artigo de acesso livre sob
licença Creative Commons



<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/3.0/>

e psíquicos que abrangem diversas disciplinas científicas. Além disso, a música pode ter um impacto significativo na saúde mental, especialmente no contexto da depressão [3].

Reconhecendo que transmitir conhecimentos amplos e práticos continua sendo um desafio significativo para os professores de física, especialmente nas escolas públicas, esta proposta busca despertar o interesse dos alunos por meio da exploração do mundo sonoro. A inserção das tecnologias digitais de informação e comunicação (TDICs) no ensino de física tem transformado a maneira como os estudantes realizam experimentos e compreendem conceitos científicos. O uso de aplicativos como o PhyPhox, que utiliza os sensores de smartphones para realizar medições físicas, oferece uma alternativa prática e de baixo custo para conduzir experimentos em ambientes educacionais com recursos limitados.

Além de promover a acessibilidade, essas tecnologias tornam o aprendizado mais interativo e envolvente, permitindo que os alunos explorem fenômenos físicos em tempo real. No contexto deste trabalho, o PhyPhox possibilita a integração direta entre teoria e prática, ao permitir a realização de medições acústicas com precisão, facilitando a análise dos dados gerados. Ao modernizar o ensino experimental, essas ferramentas estimulam o desenvolvimento de habilidades analíticas e científicas nos estudantes, aproximando-os da realidade prática do trabalho em laboratório, mesmo fora de um ambiente especializado.

Experimentos acessíveis com smartphones tornam a ciência mais próxima de todos

2. Descrevendo as vibrações

Durante a percussão de uma das cordas de um violão, ou de qualquer outro objeto que possa vibrar emitindo som, é possível estudar a emissão desse som e caracterizar suas propriedades por meio de modelos simples. Considerando apenas uma das cordas do violão, podemos identificar os dois extremos que a prendem, denominados pontos A e B, tendo em vista que a corda precisa estar tensionada para produzir som quando dedilhada (Fig. 1). O ponto A, que interrompe as vibrações em uma das extremidades da corda devido ao contato com esta, é chamado de “pestana”. Esse componente, localizado próximo à “mão” do violão, também possibilita o tensionamento das cordas por meio das tarraxas, que se encontram próximas a ele.

Já o ponto B, que exerce o papel de manter a segunda extremidade da corda fixa, é denominado rastilho. Este se mantém fixo graças ao cavalete, também presente na mesma região do instrumento. Suponhamos que a corda possua comprimento total L e massa por unidade de comprimento μ (densidade linear da corda) e seja mantida esticada por uma certa força de tensão T , que, como mencionado anteriormente, pode ser livremente variada por meio das tarraxas. Ao afi-

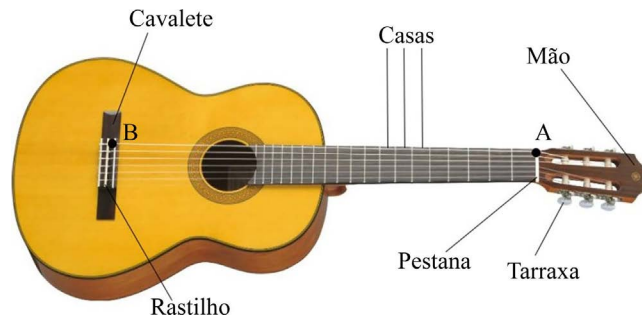


Figura 1 - Imagem esquemática de um violão genérico com cordas de nylon, mostrando as localizações dos pontos A e B, e dos componentes citados.

nar um violão, tudo o que se faz é variar essa força, afrouxando ou apertando as tarraxas. Ao percutir ou dedilhar uma corda em um certo ponto, dois pulsos ondulatórios elásticos transversais se propagam, um para a esquerda e outro para a direita, afastando-se da região inicial de propagação com uma certa velocidade [2].

Observando-se a estrutura do instrumento, pode-se notar a abertura que origina a caixa ressonadora e as diversas casas que permitem alterar o comprimento total L , variando independentemente a frequência de cada uma das cordas. A caixa acústica do violão desempenha um papel fundamental na amplificação do som. Quando uma corda vibra, ela transfere parte de sua energia para o corpo do violão, que atua como uma caixa de ressonância. A caixa acústica amplifica as vibrações sonoras, permitindo que o som seja propagado de forma mais eficiente no ar. Além disso, a forma e os materiais da caixa ajudam a enriquecer o timbre do som, afetando tanto a intensidade quanto a qualidade tonal. Sem a caixa acústica, o som produzido seria muito mais fraco e sem o caráter ressonante que caracteriza o som típico de um violão.

A velocidade V_T dos pulsos elásticos em uma corda é inversamente proporcional à sua densidade linear μ , e proporcional à tensão T aplicada, sendo dada pela seguinte relação:

$$V_T = \sqrt{\frac{T}{\mu}}. \quad (1)$$

Podemos visualizar uma exemplificação da propagação de um pulso, de maneira simplificada, pela ilustração apresentada na Fig. 2. Nota-se que a velocidade de propagação dos pulsos não depende da intensidade com que a corda é dedilhada ou percutida.

Quando uma série de pulsos é gerada em uma corda, eles se propagam ao longo da mesma e, ao encontrarem um ponto fixo (como o rastilho ou o final da corda), são refletidos. A reflexão ocorre com inversão de fase, ou seja, o pulso refletido volta invertido em relação

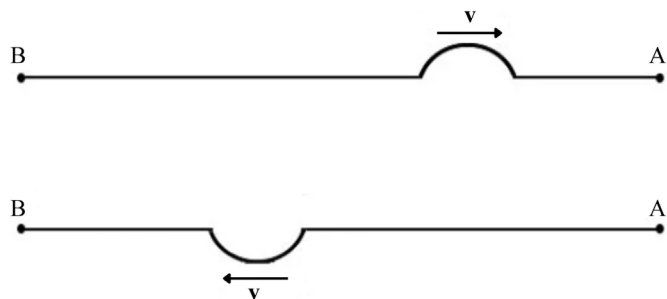


Figura 2 - Um pulso desloca-se para a direita e chega em um dos pontos de fixação; o mesmo é refletido, retornando invertido e com a mesma velocidade.

ao pulso incidente. Quando pulsos incidentes e refletidos interagem continuamente, ocorre a superposição dessas ondas, resultando na formação de ondas estacionárias. Nestas, existem pontos fixos chamados nós, que são regiões onde a amplitude da onda é sempre zero. No caso do violão, como as cordas se mantêm fixas por dois pontos extremos cada, dois dos nós estão localizados nesses próprios extremos. Apesar da formação da onda estacionária, ainda não se pode identificar um sentido de propagação, pois a superposição resulta em uma aparente imobilidade da onda como um todo.

Dadas as condições da corda ilustrada, como tensionada e fixa em duas extremidades, se for excitada por um movimento harmônico simples e de pequena amplitude, percebe-se que em certas frequências aparecem configurações de onda estacionária, como mostra a Fig. 3. Cada frequência corresponde a um modo de vibração da corda, com a respectiva função de onda; as frequências responsáveis por essas configurações são chamadas frequências de ressonância da corda.

A frequência de ressonância mais baixa é a frequência fundamental f_1 . Esta gera a onda estacionária que aparece na Fig. 3-a, o modo fundamental ou o primeiro harmônico da vibração, $n = 1$. A frequência de ressonância seguinte, f_2 , provoca a onda estacionária da Fig 3-b. Esse modo de vibração tem a frequência igual ao dobro da frequência fundamental e é o segundo harmônico, $n = 2$. A frequência de ressonância seguinte, f_3 , é o triplo da frequência fundamental e provoca a configuração do terceiro harmônico Fig 3-c. Em geral, se λ_n for o comprimento de onda do n -ésimo harmônico, obtém-se a relação da Eq. (2), que é o resultado da condição de onda estacionária com extremidades fixas [4]

$$\lambda_n = \frac{2L}{n}, n = 1, 2, 3, \dots \quad (2)$$

Entre cada par de nós sucessivos há um ponto de amplitude máxima de vibração. Através do resultado indicado na Eq. (3), é possível estabelecermos uma relação entre a velocidade da onda na corda e o comprimento da corda às frequências de ressonância

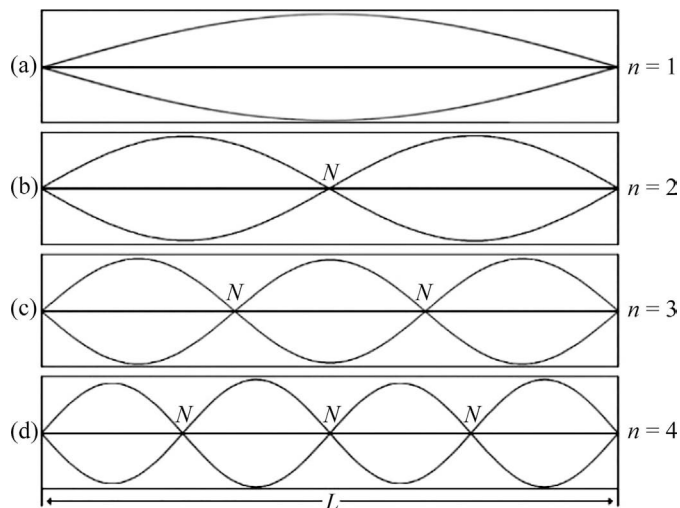


Figura 3 - Diagrama mostrando uma representação de ondas estacionárias em uma corda com as extremidades fixas, onde os pontos identificados por N são os nós.

$$f_n = \frac{V_T}{\lambda_n} = n \frac{V_T}{2L}. \quad (3)$$

Uma nota musical é o som resultante de uma vibração com uma única frequência predominante, que pode ser identificada pela sua altura (grave ou aguda). No contexto de um violão, tocar uma única corda produz uma nota cuja frequência depende da tensão, espessura e comprimento da corda, como já mencionado. Já um acorde é a combinação simultânea de duas ou mais notas com frequências diferentes que, quando tocadas juntas, formam uma harmonia. A distinção entre notas e acordes é essencial para o experimento proposto neste trabalho, pois o método abordado baseia-se na análise de um sinal com uma única frequência, ou seja, uma única nota, e não na sobreposição de várias frequências, como ocorre em um acorde.

As oitavas no violão referem-se ao intervalo entre duas notas de mesmo nome - por exemplo, G -, mas com números sequenciais, como G3 e G4, que estão separadas por uma oitava. Nesse caso, a frequência da nota mais aguda (G4) é o dobro da frequência da nota mais grave (G3), caracterizando assim o intervalo de uma oitava. No contexto do violão, isso significa que, ao tocar uma nota em uma determinada casa e, em seguida, tocar uma nota de mesmo nome em uma casa mais alta (ou mais baixa) da mesma corda, estará sendo executada a transição para a próxima oitava. O entendimento das oitavas musicais é essencial para estudos mais avançados no contexto da teoria musical aplicada a violões e guitarras [5]. As oitavas presentes no som dependem do instrumento utilizado, que gera diferentes frequências.

Quando uma corda vibra em um determinado modo, um segmento da corda oscila para cima e para baixo repetidamente. A forma dessa oscilação pode ser

descrita como uma onda estacionária e a função deslocamento $y_n(x, t)$ é dada por:

$$y_n(x, t) = A_n(x) \cos(\omega_n t + \delta_n), \quad (4)$$

onde ω_n é a frequência angular, δ_n a constante de fase (que depende das condições iniciais) e $A_n(x)$ é a amplitude, que depende da localização do segmento. Essa função $A_n(x)$ representa a forma da corda em uma posição específica [4].

No ponto de amplitude máxima da vibração, a forma da corda vibrando no n -ésimo harmônico é dada por

$$A_n(x) = A_n \sin(k_n x), \quad (5)$$

em que $k_n = 2\pi/\lambda_n$ é o número de onda. A função de onda de uma onda estacionária no n -ésimo harmônico pode ser expressa como

$$y_n(x, t) = A_n \sin(k_n x) \cos(\omega_n t + \delta_n). \quad (6)$$

Em suma, exploramos os fundamentos das vibrações e suas implicações na formação de ondas estacionárias. As equações que descrevem as ondas estacionárias fornecem uma base sólida para a investigação de diversos cenários, desde cordas vibrantes até instrumentos musicais. Além disso, destacamos a aplicação prática desses conceitos no ensino de física, demonstrando como uma abordagem prática e envolvente pode facilitar a compreensão dos alunos.

3. Smartphone como caixa de ferramentas

A disciplina de física em escolas e cursos de graduação sempre foi, e ainda é, essencialmente teórica. Quando há algum tipo de experimento, estes geralmente se limitam a instruções a serem seguidas em laboratório ou a demonstrações realizadas por instrutores. Tais métodos de ensino estão enraizados na história metodológica do ensino de física e também associados à falta de acesso a espaços e equipamentos dedicados [6].

No entanto, ao longo dos anos, surgiram diversos aplicativos para smartphones que facilitam a visualização e a aprendizagem de diferentes disciplinas, graças à tecnologia presente nesses dispositivos. Nesse contexto, o aplicativo PhyPhox, desenvolvido por um dos institutos de física da Universidade Técnica da Renânia, na Alemanha, permite que qualquer smartphone seja utilizado como ferramenta de medição para experimentos físicos (Fig. 4). Considerando que praticamente todo estudante possui um smartphone atualmente, os custos necessários para realizar diversos tipos de experimentos acústicos e mecânicos são drasticamente reduzidos. Além disso,

A autocorrelação de áudio revela propriedades fundamentais do som emitido por instrumentos musicais

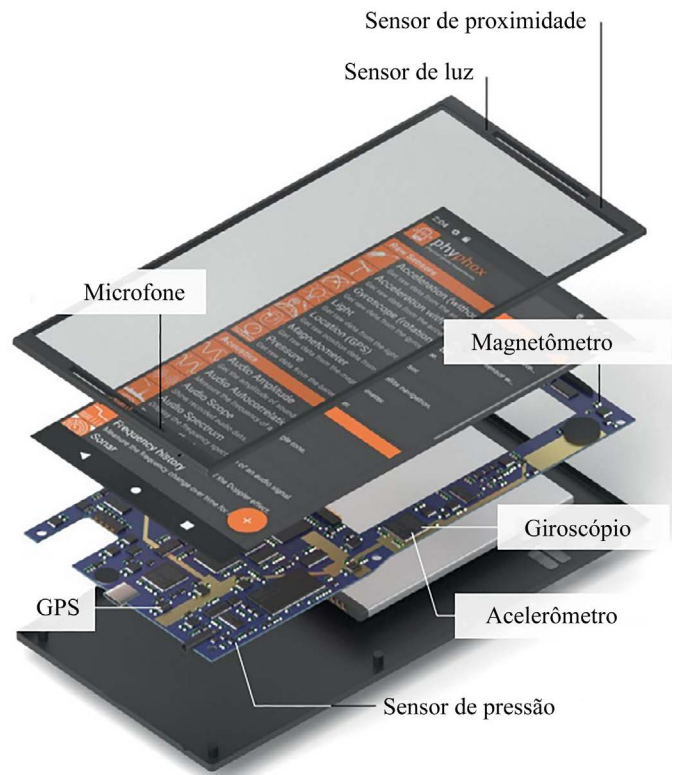


Figura 4 - Alguns dos sensores presentes em um smartphone que podem ser usados para realizar experimentos de física. Fonte: Ref. [6].

muitas escolas públicas dispõem de violões, que podem ser utilizados por professores e alunos.

Sendo assim, podemos facilmente assumir que é possível transformar o smartphone em um laboratório de bolso. A Fig. 5 ilustra alguns dos experimentos disponíveis no aplicativo PhyPhox, na área de acústica, que é a mesma explorada neste trabalho. A diversidade e a disponibilidade de experimentos dependem do número de sensores físicos integrados ao smartphone. Experimentos e propostas interessantes, como a determinação da velocidade do som por meio de uma simples medida de tempo de voo utilizando smartphones, já foram realizados com o auxílio do aplicativo PhyPhox [7]. O experimento “Autocorrelação de Áudio”

permite determinar a frequência e o período de um sinal de áudio de frequência única - por exemplo, uma única nota de um violão (e não um acorde) - utilizando o microfone do dispositivo.

No entanto, é importante observar que uma única nota de um violão não emite apenas uma frequência, mas sim um conjunto de frequências harmônicas. Como indicado no diagrama e na explicação do tópico anterior, todas as frequências harmônicas são emitidas simultaneamente, sendo a frequência fundamental (ou primeiro harmônico, $n = 1$) a mais perceptível. O experimento de espectro associado à

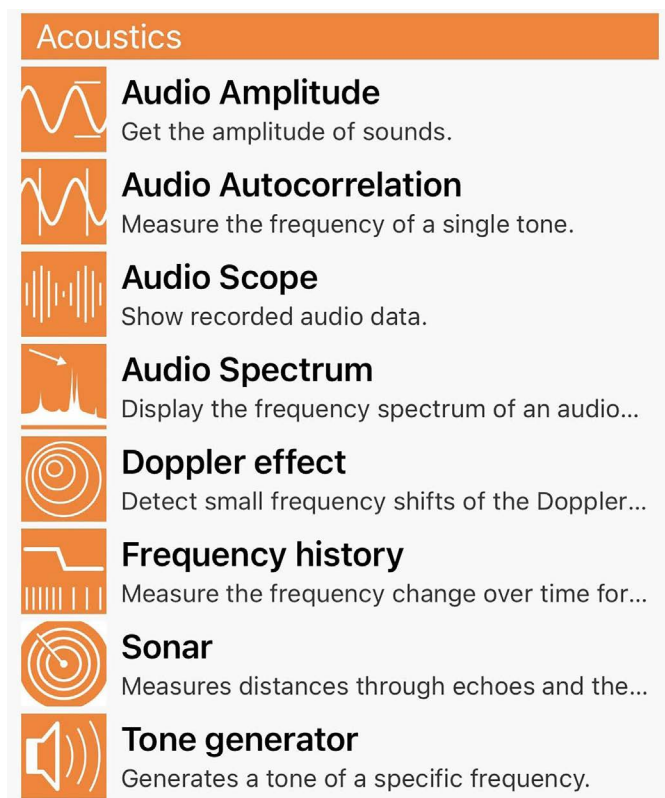


Figura 5 - Experimentos de acústica disponíveis no aplicativo PhyPhox.

nota (*Audio Spectrum*) também demonstra que não é emitida apenas uma frequência. O aplicativo, na versão em português, informa que a nota deve possuir uma frequência fixa, não necessariamente única, e identifica a frequência correspondente à nota tocada.

A função de correlação no tempo, também conhecida como autocorrelação, analisa como um sinal se correlaciona consigo mesmo ao longo do tempo. No contexto do áudio, essa técnica pode ser utilizada para identificar padrões e propriedades do som. A ideia é avaliar quão semelhante é o sinal original em relação a suas versões deslocadas no tempo [8]. Isso é particularmente útil para identificar padrões repetitivos ou frequências dominantes em um sinal de áudio. Embora estejam relacionadas às funções de onda, os picos e posições apresentados nos gráficos gerados podem fornecer informações sobre a frequência fundamental do som produzido.

4. Digitalizando o som do violão

Compreendendo a premissa de que o experimento em questão identifica a frequência fundamental de uma nota musical, utilizamos os seguintes materiais em nossos testes:

- Um violão convencional da marca Giannini com cordas de nylon, afinado de acordo com a afinação padrão: Mi (E), Lá (A), Ré (D), Sol (G), Si (B) e Mi (E);

- Um smartphone, modelo Xiaomi Mi 9S¹ com o aplicativo PhyPhox instalado.

Realizamos o experimento seguindo o roteiro descrito abaixo:

1. Abrimos o aplicativo e, no campo de acústica, selecionamos o experimento “Audio Autocorrelation”;
2. Tocamos no ícone de “play”, localizado na parte superior da tela e dedilhamos uma vez a corda desejada do violão. Esperamos por cerca de três segundos e tocamos no ícone de “pause”;
3. Exportamos a captura da tela tocando no ícone de três pontos localizado na parte superior direita do aplicativo e em seguida na opção “Share screenshot”.

Dessa maneira, registramos o som emitido pelas seis cordas quando tocadas soltas, capturando não apenas a nota musical correspondente, mas também o espectro da função de onda associada (Fig. 6). Ressalta-se a importância de um ambiente relativamente silencioso, pois ruídos de fundo podem influenciar a confiabilidade da frequência medida. A partir dos gráficos gerados pelo aplicativo, é possível realizar diversas abordagens no ensino de física, como apresentar o cálculo da velocidade de propagação de uma onda gerada utilizando medidas experimentais, relacionar a distância entre os picos apresentados nos gráficos com a frequência fundamental do som, demonstrar como o aumento da tensão da corda implica na alteração do som, assim como a alteração do comprimento L da corda, entre outras. Essas abordagens serão mais bem discutidas no próximo tópico.

Além dos gráficos, foram obtidas outras informações sobre o som gerado, como as oitavas, representadas pelo número que aparece após a nota musical identificada, por exemplo, G3. Também nas medições, observamos o termo “cents from note” ou “cents da nota”, que se refere à diferença de altura (frequência) entre a nota musical medida e uma nota de referência. *Cents* é uma unidade de medida usada na música para expressar a diferença de altura entre dois sons. Um *cent* representa 1/100 de um semitom, que é a menor distância musical entre duas notas em uma escala temperada [8]. A escala temperada é a escala musical padrão usada na música ocidental, na qual a oitava é dividida em 12 semitons. Assim, se a diferença for 100 *cents*, isso equivale a um semitom; se for 1.200 *cents*, trata-se de uma oitava completa.

De modo geral, a escala musical pode ser entendida como uma sequência ordenada de notas dispostas em uma relação específica de alturas, geralmente definida por intervalos determinados. Essas notas constituem a base para a construção de melodias e harmonias em uma peça musical. As escalas mais comuns, como a escala maior e a escala menor, seguem padrões definidos de tons e semitons, proporcionando uma estrutura sobre a qual os músicos organizam suas composições.

Gráfico das cordas soltas do violão (PhyPhox)

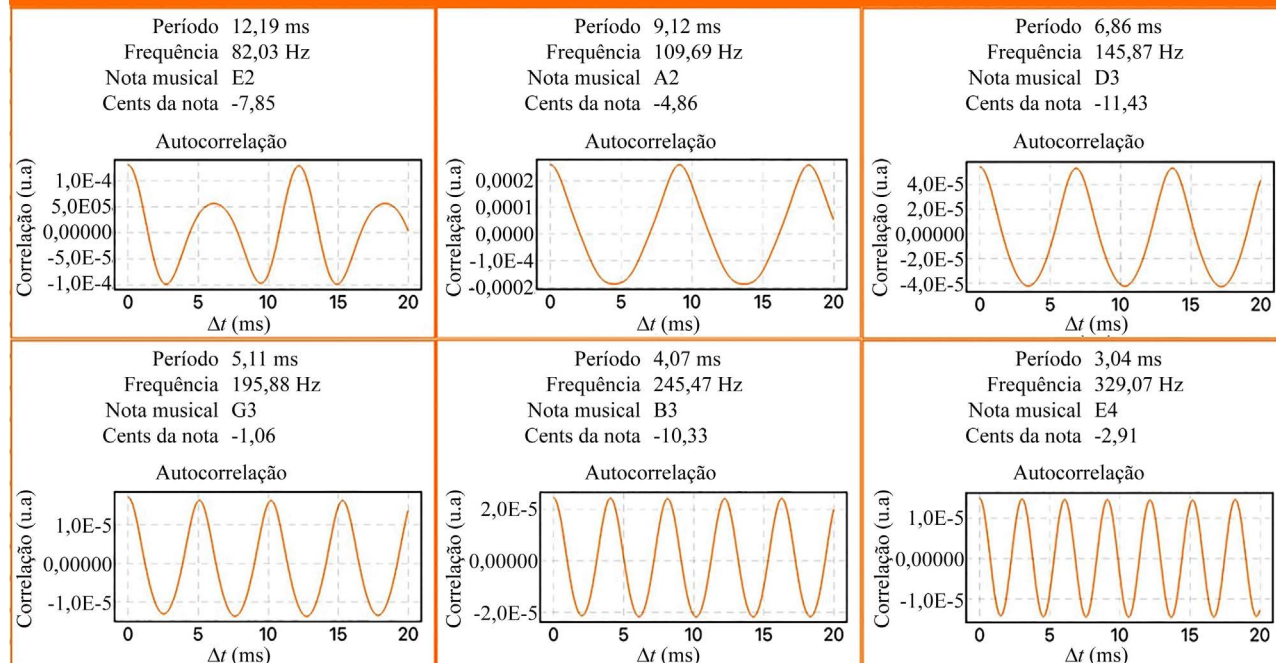


Figura 6 - Gráficos gerados pelo aplicativo, ao detectar os sons tocados pelo violão nas seis diferentes cordas. Fonte: Aplicativo PhyPhox.

Além disso, as escalas musicais foram, na verdade, definidas pela ciência, havendo uma rica história que culminou no estabelecimento das frequências das notas musicais utilizadas na música ocidental contemporânea. Um exemplo notável é a escala igualmente temperada, que é construída com base em uma progressão geométrica (PG) e recebeu contribuições significativas de físicos e matemáticos ao longo dos séculos [9].

5. Resultados e Discussões

As medidas obtidas a partir do PhyPhox mostraram-se satisfatórias, pois as frequências e oitavas geradas para cada nota musical estão muito próximas das esperadas para uma escala musical temperada [8], como apresentado na Tabela 1.

Este tópico aborda algumas possíveis discussões no contexto da sala de aula, com base nos diversos dados e informações levantados neste trabalho. Por exemplo, é

Tabela 1: Medidas realizadas com o experimento “Audio Autocorrelation” do aplicativo PhyPhox, utilizando um violão com cordas de nylon.

Nota	Frequência esperada	Frequência medida
E2	82,41 Hz	82,03 Hz
A2	110,00 Hz	109,69 Hz
D3	146,83 Hz	145,87 Hz
G3	196,00 Hz	195,88 Hz
B3	246,94 Hz	245,47 Hz
E4	329,63 Hz	329,07 Hz

possível calcular a velocidade de propagação de uma onda gerada através da Eq. (3), já que o comprimento de onda é conhecido pela relação com L e a frequência f_n determinada pelas medições do PhyPhox, de acordo com o modo de vibração da corda. Essa informação sobre a velocidade é fundamental por várias razões. Primeiramente, permite compreender melhor a resposta acústica do instrumento após a geração das ondas. Em segundo lugar, o valor da velocidade de propagação de uma onda influencia diretamente a frequência das notas produzidas, sendo um fator crucial na afinação do violão. A precisão da afinação depende da tensão adequada e da massa da corda, que determinam a velocidade da onda. Certamente, esse valor não será o mesmo para todas as cordas, pois cordas com diferentes espessuras e materiais apresentam densidades lineares distintas e, frequentemente, são afinadas sob tensões distintas. As cordas mais graves, por exemplo, são mais grossas, possuem maior densidade linear e, por isso, a velocidade de propagação da onda nelas tende a ser menor, resultando em frequências mais baixas.

Ao se calcular a velocidade para várias cordas do violão, é possível analisar como essas diferenças afetam a sonoridade e a tocabilidade do instrumento. Assim, essas informações podem ser utilizadas para otimizar a construção do violão ou para ajustar as propriedades das cordas de acordo com determinados estilos musicais, sendo um fator decisivo na escolha de

cordas com timbres específicos. Ou seja, tais dados são úteis para músicos que desejam características específicas de propagação do som.

Nos gráficos gerados pelo aplicativo, pode-se observar que as intensidades dos picos de autocorrelação podem variar ao longo do tempo, indicando que a amplitude do som da nota está mudando. Isso pode ser resultado de pequenas flutuações na forma de onda original. Essas variações ocorrem devido à dinâmica do instrumento, como a interação entre a corda e o ar, ou à atenuação natural do som à medida que a corda vibra. Além disso, fatores externos, como a captura do som pelo microfone e a resposta acústica do ambiente, também podem influenciar essa diminuição gradual nas intensidades dos picos. Em termos práticos, esse comportamento reflete a realidade do som, que tende a perder energia com o tempo, o que é esperado para uma onda sonora real.

Partindo do pressuposto de que há um violão disponível na sala de aula, torna-se fundamental, no contexto do ensino da física do som, realizar uma demonstração prática tocando diferentes notas nas cordas do instrumento. Explica-se, então, a variação na altura do som gerado em função de cada corda, onde, devido aos diferentes valores de densidade linear, esperam-se sons mais graves nas cordas mais grossas (maior massa por unidade de comprimento) e sons mais agudos nas cordas mais finas (menor massa por unidade de comprimento). Além disso, demonstra-se que a alteração da tensão de uma corda, por meio das tarraxas, resulta em uma mudança direta no som produzido por ela, conforme explicado anteriormente e previsto pela Eq. (1).

Outro método para alterar o som gerado por uma corda do violão é o uso das diferentes casas presentes no braço do instrumento. Isso consiste em pressionar a corda em uma dessas divisórias e dedilhá-la ao mesmo tempo. Na prática, isso equivale a “alterar” o comprimento vibrante L da corda, diminuindo-o. Essa mudança causa um aumento na frequência/altura do som

gerado em diferentes graus, dependendo da casa em que a corda é pressionada. Quanto maior o número da casa, mais agudo será o som produzido. Em outras palavras, quanto mais reduzimos o comprimento vibrante da corda, maior será a velocidade de propagação das ondas geradas, conforme previsto pela Eq. (3).

Por exemplo, utilizando a 5ª corda do instrumento, que, quando dedilhada solta, corresponde à nota Lá (A2), podemos reproduzir as mesmas notas das próximas três cordas ao pressionar as casas apropriadas. A Fig. 7 ilustra o som gerado pela 5ª corda quando dedilhada enquanto pressionada nas casas 5, 10 e 14, respectivamente.

Nessas medições, atingimos as mesmas notas de diferentes cordas utilizando apenas uma, graças à possibilidade de variar o comprimento vibrante L por meio das casas. As notas D3, G3 e B3 foram alcançadas com certa precisão e apresentaram frequências quase iguais às geradas pelas cordas 4, 3 e 2. Vale ressaltar que o uso das casas do violão sempre torna o som da corda mais agudo, e não o contrário.

Recomendamos a exposição de vídeos produzidos por professores e/ou alunos para complementar as aulas, pois existem aparatos experimentais didáticos que demonstram a formação de ondas estacionárias em uma corda, gerando a configuração correspondente a cada harmônico. Uma sugestão de vídeo pode ser encontrada na seção de Referências [10]. Além disso, também há espaço para abordar tópicos mais elementares, como a relação direta entre a frequência e a altura musical. Quanto maior a frequência, mais agudo é o som; quanto menor a frequência, mais grave é o som. O inverso ocorre ao se considerar o comprimento de onda como parâmetro em vez da frequência, pois este é inversamente proporcional à frequência.

As Eqs. (4), (5) e (6) oferecem uma descrição matemática precisa do movimento da corda, conectando os resultados experimentais à teoria das ondas estacionárias. Por exemplo, a Eq. (6) indica que o desloca-

A abordagem prática de variação do comprimento vibrante nas cordas facilita a compreensão da relação entre frequência, comprimento de onda e velocidade

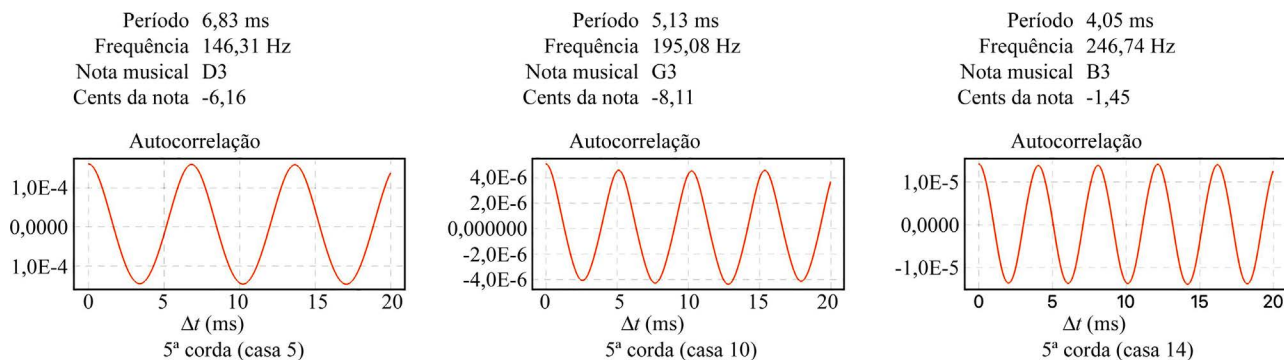


Figura 7 - Gráficos gerados pelo aplicativo, ao detectar os sons tocados pelo violão na 5ª corda, com três casas diferentes. Fonte: Adaptada do aplicativo PhyPhox.

mento da corda em qualquer ponto x e instante t é uma função tanto da frequência angular ω_n , diretamente relacionada à velocidade de propagação da onda - que, como vimos, pode ser calculada -, quanto do número de onda k_n , que é uma grandeza inversamente proporcional ao comprimento de onda do n -ésimo harmônico. Os valores para as velocidades de propagação das ondas podem ser comparados com as previsões teóricas fornecidas por essas equações. A análise experimental confirma que a frequência angular e o número de onda variam de acordo com a tensão e a densidade linear das diferentes cordas, validando a equação teórica para ondas estacionárias na corda do violão. Além disso, a amplitude $A_n(x)$ pode ser relacionada diretamente à vibração máxima observada nos pontos de oscilação da corda, sendo útil para abordagens visuais ou ilustrativas. Recomendamos a aplicação da abordagem descrita neste parágrafo em aulas de ensino superior, especialmente em disciplinas de física ondulatória, pois, se aplicada corretamente, pode fortalecer significativamente a compreensão dos alunos sobre ondas estacionárias.

Uma vez que é possível exportar os dados de qualquer experimento do PhyPhox no formato CSV (Comma-Separated Values), existem várias maneiras de gerar gráficos a partir desses dados. Isso pode ser útil por diversos motivos, como a personalização dos gráficos, maior entendimento dos dados, possibilidade de plotar funções de onda de várias notas em um único gráfico, entre outros. Esses fatores tornam viável a comparação entre notas e até mesmo a elaboração de problemas didáticos relacionados a ondas.

6. Conclusão

Ao longo deste trabalho, exploramos uma alternativa acessível para o ensino de física, aplicável tanto

ao nível médio quanto ao superior. Unindo a tecnologia do aplicativo PhyPhox à expressividade do violão, o experimento realizado consistiu na análise das notas musicais emitidas por cada corda do violão, proporcionando aos estudantes a oportunidade de não apenas visualizar, mas também experimentar conceitos fundamentais de ondas e acústica.

Os gráficos gerados revelaram as características de cada nota em termos de suas respectivas funções de onda, facilitando a compreensão de propriedades essenciais das ondas estacionárias em uma corda vibrante. Ao introduzir as equações e os fundamentos teóricos das ondas estacionárias em uma corda fixa, buscamos apresentar a natureza matemática dos fenômenos observados. Essa interseção entre teoria e prática oferece uma perspectiva abrangente, conectando os conceitos abstratos da física às experiências concretas da música.

Em um cenário educacional em constante evolução, é essencial adotar métodos que cativem e estimulem os estudantes. A fusão entre tecnologia acessível e o potencial educativo do violão abre caminho para uma abordagem mais dinâmica e participativa no ensino de física. Consideramos este trabalho não apenas como um experimento, mas como um convite à exploração contínua e à inovação no campo do ensino de ciências.

Agradecimentos

O trabalho apresentado neste artigo presta os devidos agradecimentos à Universidade Federal de Mato Grosso e ao CNPq.

Recebido em: 28 de Junho de 2024

Aceito em: 25 de Novembro de 2024

Nota

¹Smartphones diversos podem ser utilizados, desde que possuam microfone e sistemas Android ou IOS.

Referências

- [1] E.M. Santos, C. Molina, A.P.B. Tufaille, Revista Brasileira de Ensino de Física **37**, 2507 (2013). [doi](#)
- [2] A. Kandus, F.W. Gutmann, C.M.C. Castilho, Revista Brasileira de Ensino de Física **28**, 427 (2006). [doi](#)
- [3] S. Garrido, E. Schubert, Music Perception: An Interdisciplinary Journal **32**, 313 (2015). [doi](#)
- [4] P.A. Tipler, *Física Para Cientistas e Engenheiros: Mecânica, Oscilações e Ondas, Termodinâmica* (LTC, Rio de Janeiro, 2000).
- [5] R. Denyer, I. Guillory, A.M. Crawford, *The Guitar Handbook* (Alfred A. Knopf, New York, 2017).
- [6] C. Stampfer, H. Heinke, S. Staacks, Nature Reviews Materials **5**, 169 (2020). [doi](#)
- [7] S. Staacks, S. Hütz, H. Heinke, C. Stampfer, The Physics Teacher **57**, 112 (2019). [doi](#)
- [8] B.H. Suits, *Physics Behind Music* (Cambridge University Press, Cambridge, 2023).
- [9] J. Fauvel, R. Flood, R. Wilson, *Music and Mathematics: From Pythagoras to Fractals* (Oxford University Press, Oxford, 2010).
- [10] G. Pimenta, *Ondas Estacionárias e Formação dos Harmônicos - Física EEI* (Vídeo On-line, Feira Conhecimento, Ibiraci, 2019). Disponível em <https://youtube.com/watch?v=kOqg5K6muUM>, acesso em 11 out. 2024.