

Análise da contribuição do som para a energia dissipativa em uma colisão inelástica

Analysis of sound contribution to dissipative energy in an inelastic collision

Regiley Pimenta Ramos de Oliveira  *1

Samuel Bueno Soltau  †2

^{1,2} Departamento de Física, Universidade Federal de Alfenas, Alfenas, MG, Brasil.

Resumo: No estudo da queda livre costuma-se desprezar as energias dissipativas decorrentes do atrito, energia térmica e sonora durante a colisão quando a partícula atinge o solo. Apresentamos um método para efetuar medidas experimentais da contribuição da dissipação devida ao som em uma colisão elástica. Utiliza-se a técnica de videoanálise para obter a posição da partícula com o uso do *software Tracker* e, para a captação e análise do som produzido durante as colisões, usa-se o *software Audacity*, sendo ambos *softwares* livres. Os cálculos efetuados a partir das medições apresentam resultados convincentes em termos proporcionais quando comparados com outros observáveis no experimento. O método aplicado mostrou-se adequado quanto a precisão exigida, porém a execução do experimento evidenciou possibilidades de aperfeiçoamento na etapa das medições.

Palavras-chave: Queda livre; Colisão elástica; Energias dissipativas; Vídeo análise; Audioanálise

Abstract: *In the study of free fall, it is usual to neglect dissipative energies resulting from friction, thermal and sound energy during the collision when the particle hits the ground. We present a method for making experimental measurements of the contribution of sound in an elastic collision. The videoanalysis technique is used to obtain the position of the particle, by the using Tracker software, and for the capture and sound analysis, by the Audacity software. Both of them are free software. The calculations performed from the measurements present convincing results in proportional comparative terms when confronted with other experimental observables. The applied method demonstrated to be adequate in terms of the required precision, even though the execution of the experiment has shown possibilities for improvement in the measurement step.*

Keywords: *Free fall; Elastic collision; Dissipative energies; Videoanalysis; Audio analysis.*

1 Introdução

É consenso que durante colisões, parte da energia cinética é convertida em calor e som. Costuma-se desprezar energias dissipativas, tais como atrito, energia térmica, energia sonora etc., durante a solução de exercícios em cursos de Física nos diversos níveis de ensino. No entanto, na natureza estas contribuições

*Endereço de correspondência: regiley.pimenta@sou.unifal-mg.edu.br

†Endereço de correspondência: samuel.soltau@unifal-mg.edu.br

estão presentes e determiná-las pode aprimorar a análise dos fenômenos físicos que as produzem. Entretanto, a determinação dessas contribuições pode ser um problema experimental desafiador dependendo da habilidade do experimentador e da disponibilidade instrumental.

Além do interesse didático, estudos abordando a dissipação da energia na forma de som são de interesse para as engenharias, pois um processo menos ruidoso é um processo com menos desperdício de energia. Por exemplo, em processos de moagem parte da energia é perdida na forma de ruídos [1]. Para aprimorar as técnicas de mensuração de fenômenos sonoros deste tipo, análises foram efetuadas colidindo bolas de diferentes materiais e tamanhos contra uma placa metálica em diferentes velocidades. Nestes experimentos foi possível mostrar que, para cada montagem experimental, obteve-se diferentes frequências nas ondas sonoras geradas [2]. Experimentos similares [3] empregaram a análise sonora para estudar a deformação nos objetos durante as colisões. Outras variações de montagens experimentais [4] corroboraram os resultados destes experimentos, porém, ao invés de fazer colidir uma bola contra uma placa, fez-se colidir duas bolas de materiais distintos uma contra a outra.

Os trabalhos citados mostram análises que empregam as ondas sonoras se propagando nos objetos durante as colisões, analisando os espectros do som, estudando em quais frequências ocorrem as maiores perdas de energia por meio de ressonâncias nos objetos colididos e, em que parte dos elementos envolvidos nos experimentos se localizam as maiores perdas por dissipação de energia na forma de sons.

Neste viés, o propósito deste trabalho é apresentar uma proposta de medição da energia cinética dissipada na forma de som durante a colisão de uma esfera maciça de polipropileno contra uma barra de ferro fundido, utilizando os *softwares* livres *Tracker*, para efetuar videoanálise e *Audacity* para a captação e a análise do som. O estudo se limita a examinar apenas a energia transferida da bola colidindo verticalmente com a superfície de metal na forma de ondas sonoras propagadas pelo ar. Não se examinam no experimento os sons propagados, por exemplo, na superfície da barra metálica. Busca-se, deste modo, estimar-se qual é a ordem de grandeza da contribuição de energia cinética dissipada na forma de som durante a colisão e corroborar a noção de que o seu descarte em medidas experimentais é efetivamente desprezível como via de regra se recomenda durante a resolução de exercícios e práticas experimentais de laboratório em aulas de Física.

Este artigo está organizado como segue: a primeira seção sintetiza o referencial teórico que embasa o estudo e o experimento. A segunda seção descreve os materiais e métodos utilizados seguida da seção que apresenta e discute os resultados obtidos e as conclusões.

2 Referencial Teórico

Esta seção aborda os conceitos físicos e definições adotadas no âmbito do estudo com o objetivo de explicitar o referencial teórico a respeito de tópicos como queda livre e energia sonora.

2.1 Corpos em queda livre

A queda livre é um fenômeno bastante discutido em livros de Física [5]. Então, apenas para deixar todos os conceitos autocontidos nesta seção, apresenta-se a energia potencial gravitacional, que é definida como

$$E_p = m g h, \quad (1)$$

onde m é a massa do objeto em queda, g é o valor da aceleração gravitacional local e h é a altura inicial a partir da qual o objeto é abandonado.

Considerando-se um objeto liberado a uma altura h , no vácuo, sua energia antes de tocar o solo será igual a energia E_p . Assumindo-se, como de hábito, todas as condições ideais, após a colisão contra o solo o objeto voltaria à posição inicial h . Porém, neste caso, a colisão é inelástica e há perdas de energia.

Pode-se analisar este fenômeno somente observando-se a altura atingida pelo corpo após seu primeiro contato com o solo. Neste caso é possível calcular a energia dissipada apenas verificando-se a diferença de altura entre os choques consecutivos. Neste caso,

$$E_l = m g (h - h_1), \quad (2)$$

onde E_l é a energia dissipada e h_1 é a altura alcançada pelo objeto após o seu primeiro contato com o solo.

A rigor, a energia dissipada é transformada em outras formas de energia, como por exemplo, em uma deformação tanto do objeto quanto da superfície contra a qual colidiu, no aumento de temperatura no ponto de contato em que o objeto tocou esta superfície e, no caso particular de interesse desse estudo, em ondas sonoras [6].

2.2 Colisões

Para compreender melhor a dissipação de energia deve-se, em primeiro lugar, entender o que é uma colisão. Pode-se definir uma colisão como uma interação com duração limitada entre dois ou mais corpos [5]. Note que, mesmo que por um instante, há uma colisão.

No estudo de colisões dois conceitos ou teoremas são primordiais: A conservação de energia e a conservação de momento (*momentum*), mas para o caso em estudo, devemos apenas abordar a conservação de momento, já que há a atuação gravitacional sobre a esfera.

2.2.1 Conservação de Energia

Como premissa para uma colisão, a lei da conservação de energia é a base para este estudo. A variação de energia existe nos corpos dentro de um dado sistema, mas a soma das energias potencial e cinética do sistema sempre será a mesma em sistemas conservativos. Ressalte-se que não é o caso do que está sendo estudado aqui, a não ser que todas as forças dissipativas sejam desconsideradas. Como se sabe, a energia não pode ser criada ou destruída; pode apenas ser transformada, com sua quantidade total permanecendo constante [6]. Equacionando este enunciado para uma situação que não se tem energias dissipativas, tem-se que

$$E_{\text{total}} = T + U, \quad (3)$$

onde T é a energia cinética e U é a energia potencial.

Nos instantes entre as colisões, isto é, o primeiro e o segundo contato entre a bola e a barra, pode-se impor sem perda de generalidade que se $T = U$. Isto, desprezando-se a resistência do ar.

$$\begin{aligned} \frac{m v_1^2}{2} &= m g h_1 \\ \frac{m v_2^2}{2} &= m g h_2 \end{aligned} \quad (4)$$

Na colisão além da conservação de momento, existe também a conservação de energia, ou seja, a energia mecânica antes deve ser igual a energia após a colisão em sistemas conservativos.

$$E_{\text{antes}} = E_{\text{depois}} \Rightarrow \frac{m v_1^2}{2} = \frac{m v_2^2}{2} \quad (5)$$

ou

$$E_{\text{antes}} = E_{\text{depois}} \Rightarrow m g h_1 = m g h_2 \quad (6)$$

mas, como se ressaltou antes, como $h_1 \neq h_2$, existe um termo faltante que contribui para que a energia se conserve. E este termo faltante que já é mencionado na equação (2), é discutido a seguir, sem perda de generalidade, pela conservação da energia total uma vez que não há conservação da energia mecânica nesse sistema.

2.3 Energia sonora

O som se propaga em ondas longitudinais, como por exemplo em instrumentos musicais de sopro [7] e em ondas transversais [6, 8]. O interesse deste estudo recai nestas últimas, pelos motivos explicitados adiante.

Ondas transversais são ondas cujas vibrações são perpendiculares à direção de propagação. Tal propagação se dá através de um meio como, por exemplo, o ar. A propagação sonora é de fato uma propagação de energia.

Vale ressaltar que a medição que se faz de ondas sonoras enfatiza a intensidade, que é definida como a energia média transmitida através da área de uma seção transversal, por unidade de tempo [8]. Então pode-se afirmar que

$$I = \frac{E}{At} = \frac{P}{A} = \frac{W}{m^2}, \quad (7)$$

onde E é a energia, A é a área da seção transversal, t é o tempo de propagação e P é a potência.

A unidade de intensidade sonora é o bel, denotada por B, em homenagem a Alexander Graham Bell (1847-1922). Entretanto, por conveniência, em documentos técnicos e manuais de engenharia e edição de áudio, usa-se um múltiplo, o decibel (dB), pois ao aumentar a intensidade sonora de 1 B, a intensidade torna-se 10 vezes maior, o que exige o emprego de medidas em escala logarítmica.

Essa opção de medir a intensidade se deve ao fato da sensibilidade do sentido humano da audição. Além do fato de existir um limiar de audibilidade, que é quando o ouvido humano não consegue perceber um som. Deste modo os microfones e os *softwares* de áudio também são construídos limitados a este limiar, que é dado por $I_0 = 10^{-12} \text{ W/m}^2$. Então para transformar de intensidade sonora para decibéis, usa-se a equação (8) a seguir

$$\alpha = 10 \log_{10} \left(\frac{I}{I_0} \right) \quad (8)$$

onde α é o nível de intensidade sonora em decibéis (dB).

3 Materiais e Métodos

A montagem experimental foi planejada para a aquisição de dados tanto de vídeo quanto para o áudio. Empregaram-se neste estudo técnicas de análise do som e de vídeo. A análise do som foi efetuada com uso do *software Audacity* [9], versão 3.1.3. A videoanálise utilizou o *software Tracker* [10], versão 6.0.8.

Utilizou-se ainda a linguagem *Python*, versão 3.8.13, com a biblioteca *Matplotlib*, versão 3.5.1, para confecção dos gráficos e a biblioteca *Numpy*, versão 1.22, para os cálculos numéricos. A linguagem *Python* foi executada em modo interativo com uso da plataforma *Jupyter Notebook*, versão 6.3.0, sob o *browser Mozilla Firefox*, versão 99.0.

Todos os *softwares* utilizados no estudo foram executados no sistema operacional GNU/Linux, distribuição Ubuntu, versão 20.04.4 LTS, tendo como plataforma um *notebook*, com processador i5, 5ª geração, 64 bits, com 8 MB de memória RAM, placa de vídeo Intel HD *Graphics* 4400 (HSW GT2) e placa de áudio *HD Realtek*.

O vídeo foi gravado no formato *mov*, utilizando uma câmera DSLR Canon 50D, com velocidade de gravação a 30 FPS. O áudio foi capturado no formato *aup* com uso de um microfone BM800, padrão polar unidirecional, com sensibilidade no intervalo de -34 dB a $130 \text{ dB} \pm 2 \text{ dB}$ ($0 \text{ dB} = 1 \text{ V/Pa}$ em 1 KHz), conectando-o a placa de áudio do computador.

No experimento usou-se uma esfera maciça (bola) de polipropileno, com massa $m = 0,0306 \text{ kg}$, colidindo contra uma barra de ferro fundido, de dimensões $10 \times 10 \times 30 \text{ cm}^3$. A escolha do material da esfera foi em função de produzir um ruído bastante nítido durante a colisão. A montagem experimental pode ser vista na Figura 1.

Para mensurar a altura da bola, foi colocada uma trena ao fundo que serviu de parâmetro de comprimento para a utilização durante a videoanálise. Para a captação do áudio, o microfone foi posicionado a uma distância de 20 cm do local da colisão e os dados gravados diretamente no *Audacity* foram posteriormente exportados para um arquivo no formato *CSV* (*Comma-separated Values*) para serem processados com uso da linguagem *Python*.

Além destes recursos e instrumentos, outros elementos constitutivos do aparato experimental são descritos e detalhados a seguir.

3.1 Videoanálise

A utilização da videoanálise é atualmente um recurso de fácil acesso pois atualmente mesmo *smartphones* têm câmeras sofisticadas com alta resolução (*Charge-Coupled Device – CCD*). Esta disponibilidade tem viabilizado inclusive o uso da videoanálise como recurso didático e alcançando diferentes níveis de ensino,

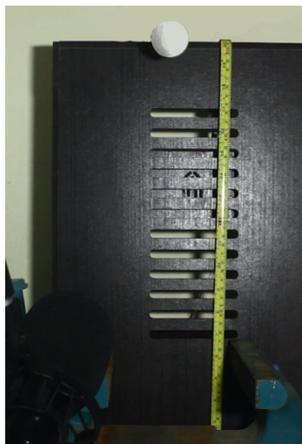


Figura 1: Montagem do experimento.

desde o ensino básico [11] até o nível superior de graduação [12]. Neste trabalho, a técnica de videoanálise servirá para obter uma medida que permita calcular a energia potencial gravitacional que uma bola possui no início do lançamento e no final, após a colisão.

Um vídeo digital é formado por uma sucessão de imagens que são substituídas em sequência dando uma sensação de movimento ao observador humano. Na maioria das câmeras essas imagens são capturadas a uma taxa de 30 FPS (*frames per second*), embora já existam equipamentos acessíveis com uma taxa de 60 FPS e outros equipamentos que vão além [13]. Cabe ressaltar que a utilização de outros equipamentos pode levar a uma taxa maior ou menor de *frames* por segundo. Cabe ao experimentador verificar essa informação antes de iniciar o experimento.

Na aquisição dos dados é importante salientar alguns parâmetros [14]:

- A cena que contém o fenômeno a ser estudado deve ser enquadrada com a câmera perpendicular ao deslocamento do objeto em movimento;
- O fundo da cena deve contrastar com o objeto de interesse ao estudo, para isso a iluminação deve ser adequada;
- De preferência, ter uma escala métrica filmada junto do fenômeno na cena, para fornecer um parâmetro de medida.

3.1.1 O software *Tracker*

O software *Tracker* é um projeto da *Open Source Physics* [15] e funciona examinando quadro a quadro de um vídeo, ou seja, imagem a imagem, permitindo adquirir com boa precisão a posição dos objetos capturados no vídeo [14].

Após a filmagem do experimento, o vídeo foi importado para o *Tracker* a fim de realizar as análises. No *Tracker* há uma opção que permite a aquisição automática dos pontos de uma trajetória. Entretanto, a qualidade das medidas obtidas com a aquisição automática depende significativamente da resolução e da configuração da câmera, por exemplo, da velocidade de abertura do diafragma da câmera. Se o movimento do objeto for mais rápido do que a capacidade de captação da imagem pelo mecanismo da câmera, o resultado é um “borrão” na imagem, como mostra a região circulada em vermelho na Figura 2.

De início tentou-se fazer o rastreamento totalmente automático. Porém, isso não foi possível devido às características do *hardware* da câmera. Como todos os *frames* do vídeo eram essenciais para uma boa medida e o que interessava a rigor eram as medidas de posição (alturas), a solução foi coletar todos os dados no modo manual, *frame a frame*. Quando todos os parâmetros são ajustados adequadamente, a aquisição de dados, seja no modo automático, seja no modo *frame a frame*, como foi empregado neste estudo, resulta em medidas precisas.

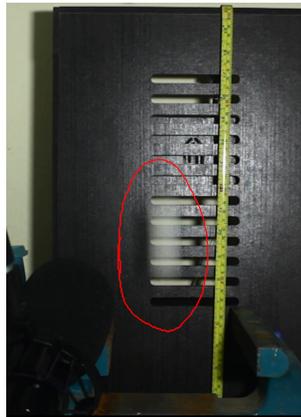


Figura 2: Detalhe do botão branco que ocorre quando a câmera não consegue capturar com precisão a posição da bola na cena.

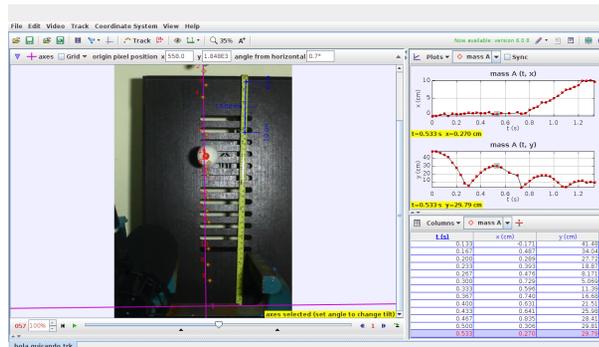


Figura 3: Tela do *software Tracker* com o evento sob análise.

Na Figura 3 apresenta-se uma tela do *Tracker* com o experimento montado, os pontos experimentais apresentados em dois gráficos mostrados do lado direito da Figura. O gráfico superior direito, mostra os pontos medidos ao longo do deslocamento horizontal da bola e o gráfico logo abaixo deste, mostra as medidas do deslocamento vertical da bola. Ambas as medidas estão mostradas em tabela no canto inferior direito da Figura 3. No lado esquerdo da mesma Figura, a cena com o eixo de referência e orientação, uma trena para fornecer a escala e unidades de medida. Nota-se a nitidez da bola, garantindo uma boa marcação de sua posição na cena.

A videoanálise representou apenas uma parte da montagem experimental. A captação do som e os procedimentos de cálculo são abordados na sequência.

3.2 Análise do som

Embora seja mais comum a análise do som investigando o espectro [4, 1, 3, 2], neste estudo a proposta é avaliar a pressão sofrida pelo diafragma do microfone proveniente do ruído da colisão (contato) da bola de encontro a barra metálica. Tal pressão é detectada por uma película com um ímã anexado a ela que vibra de acordo com a pressão do ar provocada pela propagação sonora no ar. Ao redor do ímã há uma bobina que então transforma as vibrações sentidas em corrente elétrica [16].

No computador, o dado analógico que se obtém é a diferença de potencial, ou seja, o deslocamento máximo da película do diafragma do microfone gera 1 V e corresponde a 0 dB na escala digital de correlação utilizada nos *softwares* de edição de som. Apresenta-se mais detalhes a respeito deste processo de conversão.

3.2.1 Aquisição do som e o *software Audacity*

O *Audacity* é um editor de áudio sob licença de *software* livre e de código aberto e funciona de forma estável com áudio de até 32 bits/384kHz, tratamento de ruídos integrado. O *software* permite fazer mixagem de faixas de áudio (gravação estéreo, mono ou até multi-faixa) e renderizar e unificar a saída em uma única trilha de áudio. Oferece edição flexível até o nível da amostra, bem como espectrograma e visualizações espectrais para analisar a resposta de frequência [9].

Em *softwares* de edição de áudio é comum usar uma conversão analógico-digital na qual o pico de máximo é medido em 1V/Pa e, o pico mínimo, em $-1V/Pa$, como mostrado na Figura 4. Este intervalo entre os picos de máximo e mínimo é denominado de *RMS (Root Mean Square)* [9]. Durante a conversão analógico-digital, a curva representativa do áudio é linearizada, como foi destacado na seção 2.3.

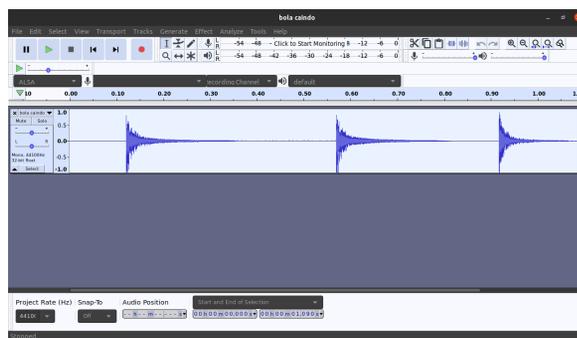


Figura 4: Tela do *Audacity* mostrando a faixa de áudio em que, no eixo das ordenadas, aparece o intervalo de $-1V/Pa$ a $1V/Pa$.

Para a conversão dos dados de analógico para digital, primeiro foi preciso transformar da forma linear para a forma logarítmica, que é medida em dB. Após esta conversão, a amplitude máxima ficou em 0 dB e a mínima, em $-\infty$. Como o gerador de gráficos *Python* não reconhece o dado no formato exportado pelo *Audacity*, o ponto de mínimo foi alterado para -100 , já que os menores valores eram próximos a este valor escolhido, como se pode ver na Figura 5.

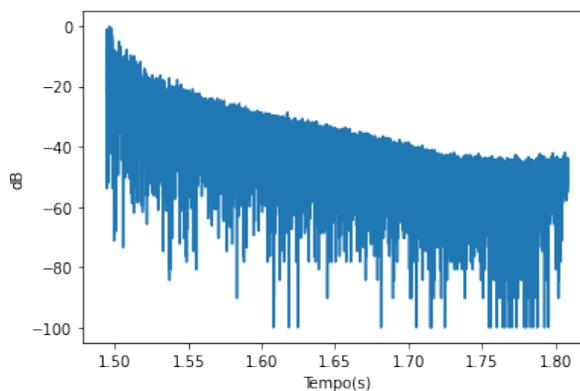


Figura 5: Gráfico convertido de RMS para dBV.

Conhecendo-se então a sensibilidade do microfone, ajustou-se a sensibilidade para o máximo e o mínimo captável pelo microfone. Somente após estes ajustes instrumentais é que foi possível proceder ao tratamento matemático e recorrer às equações (7) e (8) para poder determinar a energia do som no experimento e calcular a integral da equação (9).

$$E = \int_{t_0}^{t_f} A I_0 10^{\frac{\alpha(t)}{10}} dt \quad (9)$$

onde E é a energia sonora, t_0 e t_f são, respectivamente, os instantes inicial e final do intervalo de integração, I_0 é o limiar de audibilidade e A é a área da propagação sonora.

Na Equação (9) tem-se que o termo A diz respeito a área de propagação da onda sonora. Como a bola colide com um bloco de metal, considerou-se esta área de propagação como uma casca semi-esférica, com o centro na posição da colisão. Com isso o valor da área equivale a $A = 2\pi \times 0,04 \simeq 0,251 \text{ m}^2$.

Como não se conhece a função $\alpha(t)$ o cálculo foi efetuado numericamente, usando o Método do Trapézio [17], por meio do pacote *Numpy* da linguagem *Python*, já que eram todos pontos bem definidos.

Os resultados obtidos a partir dos dados adquiridos e tratados tanto da videoanálise quanto da análise do áudio são discutidos na próxima seção.

4 Resultados e Discussão

A obtenção de dados por videoanálise foi necessária como primeiro passo para calcular a energia mecânica do sistema entre a primeira e a segunda colisão da bola com a barra. Na Figura 6 apresenta-se o gráfico da altura em função do tempo obtido com os dados analisados com o *software Tracker*.

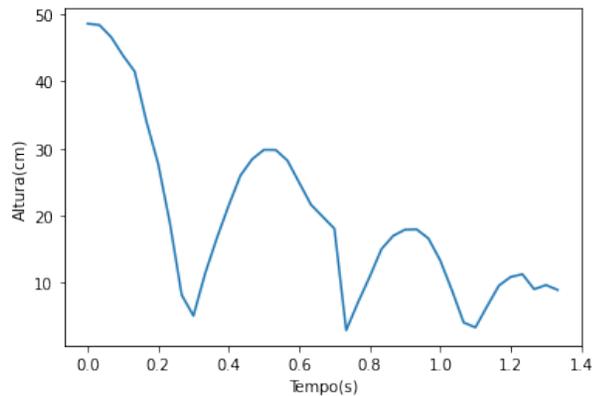


Figura 6: Gráfico tempo *versus* altura gerada a partir dos dados obtidos com videoanálise no *Tracker*.

No gráfico da Figura 6 nota-se que a evolução da curva denota claramente um amortecimento gradual conforme esperado devido às várias formas de dissipação de energia mecânica do sistema. A altura estimada nos dois picos da curva foi de $h_1 = 0,4861 \text{ m}$ e $h_2 = 0,2981 \text{ m}$.

Substituindo-se os valores encontrados na equação (2), obtém-se que a energia potencial calculada $E_l = 5,68 \times 10^{-2} \text{ J}$. Com este resultado pode-se inferir que ocorreu uma colisão inelástica, como também foi verificado em outros estudos [18], o coeficiente de restituição encontrado foi de $e = 0,78$.

Concluída a etapa de videoanálise e extraído dos dados todas as informações possíveis, o passo seguinte foi a análise do áudio gravado.

Para calcular a integral da equação (9) foi preciso recorrer ao cálculo numérico. Aplicando o Método do Trapézio com o algoritmo disponível no pacote *Numpy* da linguagem *Python*¹ para o primeiro pulso, o resultado expresso na forma gráfica está representado na Figura 7.

Após a etapa do processamento do áudio, da normalização, conversão para unidade de potência e integração, obteve-se como resultado $E = 8,97 \times 10^{-4} \text{ J}$, que representa 1,58% da energia dissipada na colisão. Este resultado corrobora os obtidos em estudos prévios [4]. Além disso, comparando com a energia total e com a energia total dissipada, a contribuição da energia dissipada na forma de som, como esperado, representa uma ínfima porcentagem da energia total. Por este motivo é justificável considerá-la desprezível na maioria dos experimentos e cálculos.

¹O código fonte dos cálculos está disponível em <https://github.com/Regiley/Calculo-dissipacao-do-som>.

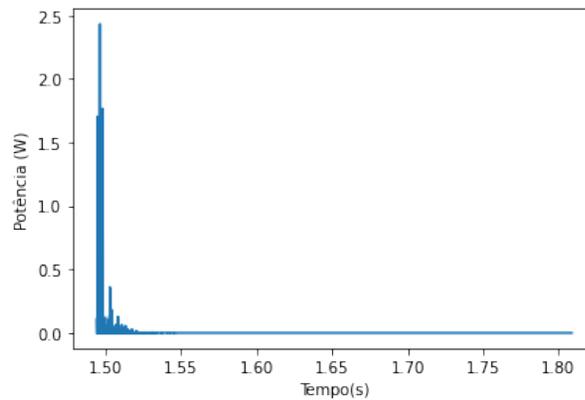


Figura 7: Gráfico do sinal normalizado, convertido de dBV para W.

5 Conclusões

A energia mecânica do sistema é a soma de sua potencial e cinética. A energia mecânica pode se apresentar completamente na forma de energia potencial ou completamente na forma de energia cinética (momento da colisão). Como se sabe, há na verdade conversão (transformação) de uma modalidade em outra.

O propósito deste estudo foi aplicar um método de medição da energia mecânica dissipada na forma de som durante a colisão de uma esfera maciça de polipropileno contra uma barra de ferro fundido, utilizando os *softwares* livres *Tracker*, para fazer a videoanálise e o *software Audacity* para a análise do som. Os processamentos dos dados de áudio, após tratamento no *Audacity*, foram exportados para um arquivo no formato *CSV*, normalizados e submetidos a cálculos numéricos efetuados com algoritmo em linguagem *Python*.

O estudo examinou unicamente a energia da bola colidindo verticalmente com a superfície de metal na forma de ondas sonoras propagadas pelo ar. Não coube no escopo deste trabalho medir os sons propagados na superfície da barra metálica. Isto exigiria um instrumental e uma montagem experimental distintas da proposta neste estudo.

Os resultados mostraram a possibilidade de medir a energia dissipada em forma de som, mesmo representando um percentual muito pequeno da energia total envolvida no fenômeno, o que justifica desconsiderar sua contribuição na maioria dos casos.

Em futuras análises, pretende-se estudar o espectro do som, bem como a propagação sonora no bloco metálico, o que poderia evidenciar a contribuição de quantidades adicionais da energia dissipada.

Agradecimentos

Os autores agradecem à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo apoio financeiro, e aos professores Artur Justiniano Roberto Júnior, Tiago José Arruda, ambos do Departamento de Física da Universidade Federal de Alfenas e ao professor Diego Samuel Rodrigues, da Faculdade de Tecnologia da Universidade de Campinas, pelas críticas e sugestões que contribuíram para aprimorar o artigo.

Referências

- [1] C. Cuadrado-Laborde, L. Damonte e L. Mendoza-Zélis. “Typical Audio Measurements in Oscillatory Ball Milling Processes and its Relationship with the Rate of Energy Transferred to the Powder”. Em: *Journal of Metastable and Nanocrystalline Materials* 20-21 (jul. de 2004), pp. 169–174. ISSN: 2297-6620. DOI: [10.4028/www.scientific.net/JMN.20-21.169](https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/JMN.20-21.169).
- [2] T. Igarashi, M. Goto e A. Kawasaki. “Studies on Impact Sound: First Report, The Sound Generated by a Ball Colliding with a Plate”. Em: *Bulletin of JSME* 28.235 (1985), pp. 148–154.

- [3] P. Troccaz, R. Woodcock e F. Laville. “Acoustic radiation due to the inelastic impact of a sphere on a rectangular plate”. Em: *The Journal of the Acoustical Society of America* 108.5 (2000), pp. 2197–2202. ISSN: 0001-4966. DOI: [10.1121/1.1312358](https://doi.org/10.1121/1.1312358).
- [4] K. Mehraby, H. K. Beheshti e M. Poursina. “Impact noise radiated by collision of two spheres: comparison between numerical simulations, experiments and analytical results”. Em: *Journal of Mechanical Science and Technology* 25.7 (2011), pp. 1675–1685. DOI: [10.1007/s12206-011-0503-z](https://doi.org/10.1007/s12206-011-0503-z).
- [5] A. Chaves. *Física básica: mecânica*. Rio de Janeiro: LTC, 2007.
- [6] P. G. Hewitt. *Física Conceitual*. 12^a ed. New York: Bookman, 2015, p. 820. ISBN: 9788582603413.
- [7] K. D. Costa e S. B. Soltau. “A Física da flauta doce: um estudo das notas nas posições comuns e alternativas”. Em: *Caderno de Física da UFES* 14.1 (2016), pp. 1–13. ISSN: 2527-0230. URL: http://dfisweb.uefs.br/caderno/voll4n1/s4Artigo01Kleyton_Flauta_e_Fisica.pdf.
- [8] H. M. Nussenzveig. *Curso de Física Básica: Fluidos, Oscilações e Ondas, Calor*. Vol. 2. São Paulo: Edgar Blücher, 2014.
- [9] Audacity. *Audacity Team: Audacity user manual*. 2022. URL: <https://manual.audacityteam.org/>.
- [10] OSP. *The Open Source Physics: Tracker user manual*. 2022. URL: https://physlets.org/tracker/tracker_help_pt_BR.pdf.
- [11] C. H. S. Marculino et al. “Uso de Vídeo-análise para Promover a Experimentação dos Conceitos de Física com Atividades ao Ar Livre”. Em: *Revista de Ensino de Ciências e Matemática* 10.3 (jun. de 2019), pp. 243–256. ISSN: 2179-426X. DOI: [10.26843/rencima.v10i3.2046](https://doi.org/10.26843/rencima.v10i3.2046). URL: <http://revistapos.cruzeirosul.edu.br/index.php/rencima/article/view/2046>.
- [12] V. L. B. de Jesus e D. G. G. Sasaki. “Vídeo-análise de um experimento de baixo custo sobre atrito cinético e atrito de rolamento”. Em: *Revista Brasileira de Ensino de Física* 36.3 (2014), pp. 1–6. DOI: [10.1590/S1806-11172014000300015](https://doi.org/10.1590/S1806-11172014000300015).
- [13] DVPro. *Manual do usuário T1340 – DVPRO*. 2022. URL: <https://dvpro.com.br/categorias/slow/cameras-slow/t/t1340/>.
- [14] D. Brown. *Tracker video analysis and modeling tool*. Version 4.751. 2013. URL: <https://www.compadre.org/osp/items/detail.cfm?ID=7365%20http://www.cabrillo.edu/~dbrown/tracker/>.
- [15] Compadre. *Open Source Physics*. 2022. URL: <https://www.compadre.org/>.
- [16] D. Hany et al. *Converting Wasted Sound Energy to Electricity by Using Condenser Microphone and Power Amplifier*. Dez. de 2020.
- [17] F. F. Campos Filho. *Algoritmos numéricos: uma abordagem moderna de cálculo numérico*. 3^a ed. Rio de Janeiro: LTC, 2018.
- [18] D. P. Meira Filho, J. K. S. Kamassury e R. C. S. Meira. “Uma discussão sobre o coeficiente de restituição”. Em: *Revista Brasileira de Ensino de Física* 39.4 (abr. de 2017), p. 4302. ISSN: 1806-1117. DOI: [10.1590/1806-9126-rbef-2016-0278](https://doi.org/10.1590/1806-9126-rbef-2016-0278).