

DETERMINAÇÃO DA VELOCIDADE DO SOM COM COMPUTADORES E CELULARES

Zwinglio Guimarães¹, Marco Andrade², Leonardo Werneck³, Leandro Mariano⁴

¹ Instituto de Física da USP/Departamento de Física Aplicada, zwinglio@if.usp.br

² Instituto de Física da USP/Departamento de Física Aplicada, maurelio@if.usp.br

³ Instituto de Física da USP/Departamento de Física Matemática, werneck@if.usp.br

⁴ Instituto de Física da USP/Departamento de Física Nuclear, lmariano@if.usp.br

Resumo

Este trabalho apresenta um procedimento experimental para medir a velocidade de propagação do som no ar com o uso de computadores ou celulares, que dispensa o uso de circuitos elétricos auxiliares. A versão mais simples do procedimento proposto se baseia no uso de ao menos dois aparelhos, porém, também é apresentada uma extensão para o uso de qualquer número de aparelhos. Com o uso de vários aparelhos é possível estimar a incerteza dos dados e obter a velocidade do som por meio de um ajuste de reta aos dados medidos. Com isso, este procedimento pode ser utilizado até mesmo em Laboratórios Didáticos de cursos de graduação para o nível superior. São discutidos os resultados de dois testes feitos em um curso de bacharelado em Física, os quais demonstram a elevada precisão e reprodutibilidade das medições feitas com o procedimento proposto. Todos os recursos computacionais utilizados são gratuitos e tem versões disponíveis para os principais sistemas operacionais usados em computadores pessoais: Windows, Linux e MAC-OS.

Palavras-chave: Laboratórios Didáticos, Velocidade do som, Recursos computacionais

I - Introdução

O uso de recursos computacionais em aulas de Física é uma prática muito difundida. Esses recursos são usados desde em experimentos assistidos por computador (BARBETA 2000) até no uso de filmagens e registros fotográficos de experimentos para a realização de análises quantitativas (FONSECA 2013). Registros sonoros feitos por computadores e celulares têm uma característica interessante para o uso em experimentos que é a elevada exatidão da taxa de amostragem, uma propriedade necessária para evitar a distorção do som medido. Isso é obtido graças ao uso de cristais de quartzo como base de tempo, o que garante uma incerteza relativa da ordem de dezenas de ppm ($\sigma_{\Delta t} \cong 10^{-5} \Delta t$).

Além disso, esses dados são digitalizados em intervalos de tempo típicos de $\approx 0,02$ ms por ponto amostrado, sendo muito comum em registros por computador o uso de taxas de aquisição de 44100 amostragens por segundo. Com isso, experimentos baseados em registros sonoros conseguem medições de tempo muito precisas ($\sigma_{\Delta t} \approx 0,1 - 0,5$ ms) quando os eventos de interesse correspondem à eventos sonoros bem definidos em tempo (AGUIAR 2012; CAVALCANTE 2002).

No entanto, apesar de parecer adequado para a medição da velocidade de propagação do som no ar (cujo tempo de propagação é ~ 3 ms/m), medições diretas da velocidade do som entre dois microfones ligados à um mesmo computador não podem ser feitas com facilidade porque o sinal do microfone de computadores

necessita de alimentação e é, de fato, um sinal *monocanal* (um dos 3 contatos do conector *estéreo* do microfone é usado como fonte de tensão para o microfone (AGUIAR 2005)) o que não permite que o computador identifique dois microfones conectados a ele na entrada de microfone como sendo sinais distintos.

Uma solução para contornar essa limitação foi apresentada no SNEF de 2005 (AGUIAR 2005) e se baseia no uso de amplificadores operacionais com alimentação externa (para os amplificadores e para os microfones) para gerar um sinal possa ser ligado na entrada de áudio auxiliar do computador, que é verdadeiramente uma entrada *estéreo*. Apesar de muito interessante, essa solução requer a construção de circuitos elétricos auxiliares, o que dificulta sua utilização.

O presente trabalho apresenta um método para a determinação da velocidade do som no ar com o uso de microfones de computadores ou celulares que não necessita da construção de circuitos auxiliares ou quaisquer alterações no funcionamento dos dispositivos. Este método permite combinar os dados obtidos por diversos dispositivos em um único ajuste, porém requer o uso simultâneo de pelo menos dois dispositivos (que podem ser diferentes: um computador e um celular).

1.1 - Algumas considerações práticas sobre a velocidade do som no ar

O som é uma onda mecânica longitudinal que se propaga em um meio material, como gases ou líquidos. Em um gás ideal, a velocidade de propagação do som, v_s , é dada por (NUSSENNZVEIG 1990):

$$v_s = \sqrt{\frac{\gamma RT}{M}} \quad (1)$$

onde $\gamma = \frac{c_p}{c_v}$ é a razão entre os calores específicos à pressão e à volume constante

($\gamma \cong 1,4$ para o ar), R é a constante universal dos gases ($R \cong 8,315 \text{ J/K mol}$), T é a temperatura absoluta (em K) e M é a massa molar (em kg/mol). Em um gás composto, a velocidade do som pode ser calculada levando em conta a contribuição dos diversos tipos de moléculas ponderados por sua composição relativa.

Assim, a velocidade com que o som se propaga no ar depende basicamente da temperatura ($\frac{\Delta v_s}{\Delta T} \cong 0,61 \frac{\text{m/s}}{\text{K}}$ para o ar seco) e da composição do ar. O efeito mais importante de composição é o devido à umidade relativa ($\Delta v_s(T = 20^\circ\text{C}) \cong 1,3 \text{ m/s}$ entre o ar seco e o completamente saturado) (NPL, 2003), provocado basicamente pela redução da massa das moléculas: moléculas de H_2O tem massa molar menor que as principais moléculas que compõem o ar (o N_2 , e o O_2) enquanto o γ das moléculas de H_2O é similar ao do ar ($\gamma_{\text{H}_2\text{O}} = \frac{8}{6} \cong 1,33$). No entanto, a intensidade da variação da velocidade do som devido ao aumento da umidade relativa do ar depende muito da temperatura: $\Delta v_s(T = 0^\circ\text{C}) \cong 0,31 \text{ m/s}$, ao passo que $\Delta v_s(T = 30^\circ\text{C}) \cong 2,3 \text{ m/s}$. Isso se deve ao fato de que com o aumento da temperatura uma maior fração de moléculas de água podem ser mantidas em suspensão no ar (e é isso que define o nível de concentração relativa de 100 % (SUITS, 1998)). Em geral o efeito devido à concentração de gás carbônico, CO_2 , é ordens de grandeza inferior ao da unidade.

II - Procedimento proposto para a medida da velocidade do som com computadores e celulares

O procedimento proposto para determinar a velocidade do som consiste na relação entre as diferenças entre os intervalos de tempo indicados por diferentes microfones (de computador ou celular) para medições simultâneas de dois eventos sonoros, A e B, produzidos em locais distintos. Os eventos A e B precisam ser bem definidos em tempo (como batidas de palma ou explosões de balões de gás).

II.1 - Versão simplificada com 2 microfones

A versão mais simples do procedimento proposto consiste no uso de apenas 2 microfones localizados entre as posições em que acontecem os eventos A e B, como representado na Figura 1(a). O microfone 1 irá detectar o evento A adiantado em relação ao microfone 2 pelo tempo que o som demorar para percorrer a distância d_{12} . Já o evento B será detectado no microfone 1 atrasado em relação à 2 pelo mesmo tempo. Assim, a diferença entre os intervalos de tempo medidos nos microfones 1 e 2 será (em módulo) igual ao dobro do tempo que o som demora para percorrer d_{12} , o que possibilita estimar a velocidade do som por:

$$v_s = 2 \frac{d_{12}}{|\Delta t_1 - \Delta t_2|}. \quad (2)$$

É preciso dois eventos sonoros em posições distintas porque não é possível garantir que diferentes aparelhos iniciem as medições exatamente ao mesmo tempo.

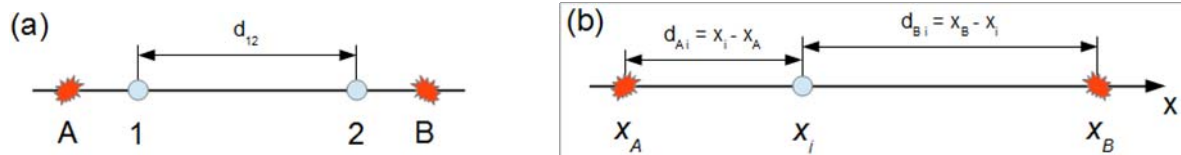


Figura 1: (a) Diagrama do experimento simplificado com dois microfones, 1 e 2, localizados no seguimento de reta que liga as posições em que ocorrem os eventos A e B. (b) Diagrama generalizado indicando o posicionamento do i -ésimo microfone, x_i , e onde ocorrem os eventos A e B, representados, respectivamente, por x_A e x_B .

II.2 - Versão para diversos microfones

Este método pode ser generalizado para possibilitar medições com diversos microfones. Considerando um evento sonoro A, gerado por uma fonte localizada na posição x_A no tempo absoluto T_A , como indicado na Figura 1(b). Esse evento será observado nos registros do sinal medido por um microfone i em um tempo arbitrário, t_{A_i} , que depende do momento em que se iniciou o registro dos sinais do microfone i .

Porém, considerando-se um segundo evento sonoro, B, produzido na posição x_B , o intervalo de tempo entre a detecção dos eventos A e B no i -ésimo microfone não depende mais do tempo absoluto em que os sinais começaram a ser registrados:

$$\Delta t_{AB_i} = t_{B_i} - t_{A_i} = T_B - T_A + \frac{d_{B_i} - d_{A_i}}{v_s}. \quad (3)$$

Se cada microfone estiver sobre a reta que liga as posições A e B, a diferença entre

as distâncias pode ser escrita como $d_{B_i} - d_{A_i} = (x_B - x_A) - 2x_i$, o que implica que o intervalo de tempo entre os eventos medido pelo microfone i é dado por:

$$\Delta t_{AB_i} = \left(T_B - T_A + \frac{x_B + x_A}{v_s} \right) - 2 \frac{x_i}{v_s}. \quad (4)$$

A equação (4) pode ser escrita na forma de uma equação de reta $y_i = \alpha + \beta x_i$, com $y_i = \Delta t_{AB_i}$, $\alpha = T_B - T_A + \frac{x_B + x_A}{v_s}$, e $\beta = \frac{-2}{v_s}$ (na verdade o sinal de β depende da definição do sentido do eixo x : β será positivo se x crescer de B para A).

III - Testes do procedimento proposto

O procedimento proposto neste trabalho foi testado com os alunos da turma de 2016 da disciplina *Tratamento Estatístico de Dados em Física Experimental* do IFUSP destinada a alunos do quarto semestre do curso de bacharelado em Física. Foram realizados dois testes: o primeiro em uma aula regular da disciplina em uma sala de informática, com medições feitas com computadores, e o segundo, em uma atividade extraclasse, quando foram utilizados apenas aparelhos celulares.

Os registros sonoros foram analisados com o programa *Audacity* que permite visualizar em detalhes o registro sonoro e identificar com precisão o tempo em que cada evento ocorreu. No caso das medições com o computador, o próprio *Audacity* foi utilizado para controlar a gravação do som, o qual foi adquirido à uma taxa de amostragem de $44,1 \text{ kHz}$. Para uma localização mais precisa dos tempos de cada evento a leitura dos pontos foi feita em *samples* (isto é, pontos de amostragem, que correspondem à $\frac{1}{44100} \text{ s} \cong 0,023 \text{ ms}$).

Em seguida, os dados foram compilados em uma planilha compartilhada no *Google Sheets*, o que possibilitou o trabalho em paralelo dos alunos no caso do experimento feito em aula. Finalmente, os ajustes foram realizados no *WebRoot* (SUAIDE, 2011), que possui recursos para a realização de uma análise correta do ponto de vista de tratamento de dados. O uso dessa ferramenta é importante no caso da disciplina em questão, por ser destinada à análise de dados em Física em nível de graduação. Porém, como os dados possuem incertezas iguais, qualquer método de regressão linear simples (como a linha de tendência) pode ser usado para a obter a velocidade do som, desde que algum critério seja usado para estimar a incerteza desse valor.

Convém salientar que todos esses recursos de informática são gratuitos e estão disponíveis nos sistemas operacionais: *Windows*, *Linux* e *MAC-OS*.

III.1 - Atividade feita em aula com o uso de computadores

Foram feitas inicialmente duas medições com palmas batidas na mesma posição em uma sala com 30 computadores em 5 fileiras de 6 computadores cada, pois quando a posição dos eventos A e B é a mesma, todos os microfones medem o intervalo de tempo real entre as palmas. Assim, a incerteza nas medidas de intervalos de tempo foi estimada a partir do desvio-padrão dos intervalos medidos nos diversos computadores, resultando em $\sigma_{\Delta t_1} = 0,57 \text{ ms}$ e $\sigma_{\Delta t_2} = 0,44 \text{ ms}$ em duas medições com cerca de 30 dados cada. Com isso, estimamos $\sigma_{\Delta t} \cong 0,5 \text{ ms}$.

Em seguida, os microfones de cada uma das 5 fileiras de computadores foram alinhados e a distância de cada microfone à uma das paredes laterais da sala foram medidas com uma trena de 10 m graduada em milímetros, o que também ajudou no alinhamento dos microfones. A incerteza das medidas de posição foi estimada em 1 cm devido ao tamanho dos microfones, porém ela não é importante para a análise por ter um efeito muito menor que o da incerteza devida aos intervalos de tempo.

Em cada fileira o experimento foi feito com batidas de palmas alinhadas com os microfones, conforme o esquema da Figura 1, pois o desalinhamento compromete a validade da relação entre a posição do microfone e a distância deste ao pontos A e B. Os ajustes de intervalo de tempo em função da posição de cada microfone estão apresentados na Figura 2, onde se pode ver que os dados se distribuem bem ao redor da função ajustada com uma dispersão compatível com a incerteza estimadas para os intervalos de tempo.

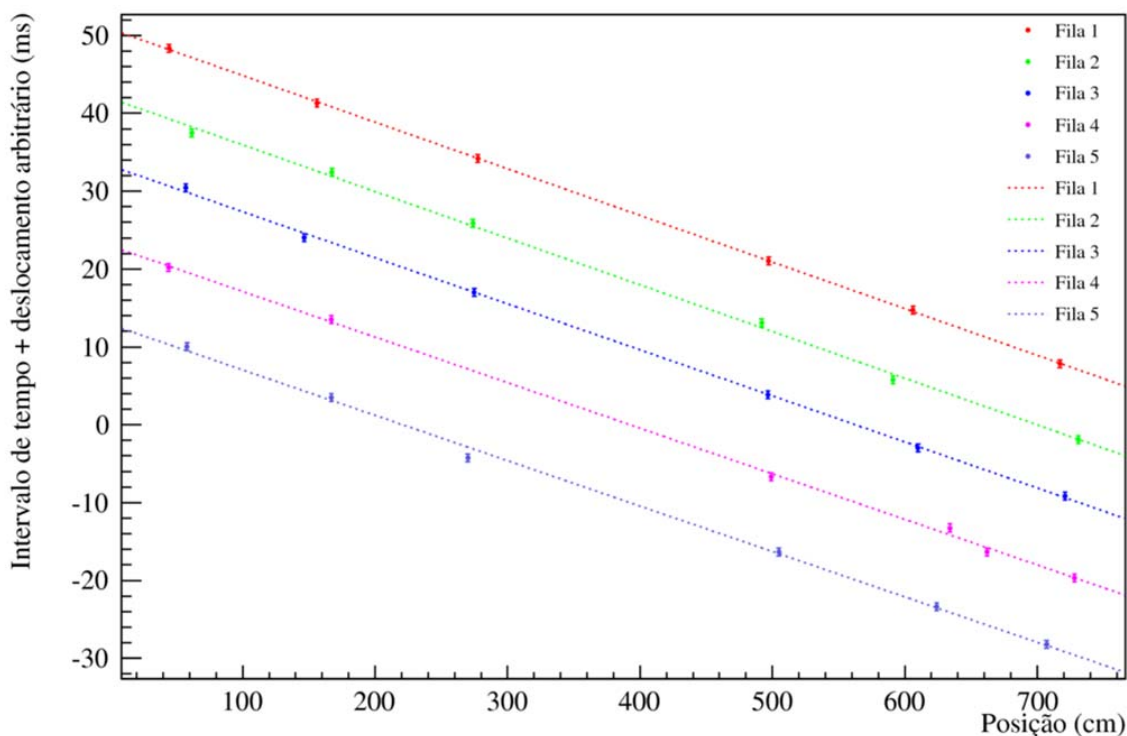


Figura 2 – Gráfico combinado dos ajustes obtidos no primeiro experimento de teste (30 computadores dispostos em 5 fileiras com 6 computadores cada). Os dados foram deslocados verticalmente para que os ajustes pudessem ser vistos no mesmo gráfico.

Como mostrado na Tabela 1, as velocidades do som obtidas nas diversas fileiras têm incertezas de $\sim 5 \text{ m/s}$, (correspondendo a incertezas relativas de $\sim 1,5\%$) e são todas compatíveis entre si. Combinando-se os dados das 5 fileiras é possível obter uma estimativa global para a velocidade do som neste experimento, resultando em $v_s = (338,1 \pm 2,2) \text{ m/s}$, valor condizente com as condições ambientais do dia (12/08/2016), em que o experimento foi realizado, um dia especialmente frio para a cidade de São Paulo (INMET, 2012): $v_{s_{Teo}} = (340,5 \pm 0,6) \text{ m/s}$, calculado considerando uma temperatura de $T = (14 \pm 1) ^\circ\text{C}$ e 80 % de umidade relativa do ar.

Tabela 01: Resultados do experimento feito com 30 computadores em 5 fileiras (Teste 1).

Fileira	Velocidade do som (m/s)	χ^2 (4 graus de liberdade)
1	$333,9 \pm 4,7$	0,38
2	$333,7 \pm 4,8$	7,6
3	$338,2 \pm 4,8$	2,6
4	$341,7 \pm 4,6$	5,7
5	$343,0 \pm 5,1$	9,5

III.2 - Atividade extraclasse com o uso de celulares

Um segundo teste do procedimento com alunos foi realizado na forma de uma atividade extraclasse (de participação opcional e sem influência na nota da disciplina) com o uso de celulares. Neste experimento, realizado 3 semanas após o primeiro teste, uma fileira de carteiras foi montada em uma sala de aula vazia onde foram feitas cerca de 30 marcações de posição (uma a cada ~ 30 cm) para que os alunos colocassem os microfones de seus celulares. O professor e um monitor estouraram, com o uso de alfinetes, 4 balões cada, de forma alternada entre os extremos dessa fileira ($A_1, B_1, A_2, B_2, A_3, B_3, A_4, B_4$), de tal modo que 4 conjuntos de dados de eventos $A-B$ foram obtidos.

Com vistas a testar o efeito da variação devida à diferentes tipos de aparelhos celulares, programas e formatos de registros sonoros, nenhuma padronização foi imposta na coleta de dados deste experimento, de tal modo que foram coletados dados com taxas de amostragem indicadas como 16 kHz, 44.1 kHz e 48 kHz nos formatos sonoros *wav*, *m4a*, *mp3* e *3gpp*. Os alunos foram instruídos a enviar o arquivo sonoro por e-mail, tendo sido coletados dados de 18 celulares.

A análise desses arquivos foi feita pelo professor e revelou uma maior dificuldade com o uso de arquivos *3gpp*, usado em 2 celulares. Isso se deve ao fato desse formato, assim como o *mp3*, corresponder à uma compressão de dados com perda de informação, ao contrário dos arquivos *wav* e *m4a* onde toda a informação original é mantida. O problema é que a compactação do *3gpp* é muito grande, o que dificulta a identificação do tempo dos eventos. Convém destacar que nenhuma mudança notável foi observada com relação às diferentes taxas de amostragem. Os dados de todos os 18 celulares foram utilizados nas análises apresentadas a seguir.

Pela dispersão dos intervalos de tempo em estouros sucessivos em uma mesma posição (por exemplo, A_2-A_1) a incerteza em cada medição de tempo foi estimada usando o desvio-padrão amostral, resultando em $\sigma_{\Delta t} = 0,17$ ms, uma incerteza bem menor do que a obtida pelos alunos na análise dos dados do Teste 1 ($\approx 0,5$ ms). Em parte, isso se deve ao uso do estouro de balões para marcar o tempo ao invés de batidas de palma.

A Figura 3 mostra o ajuste de um desses conjuntos, mostrando que os pontos de distribuem bem ao redor da função ajustada com dispersão compatível com as incertezas estimadas, o que pode ser visto no gráfico de resíduos, também mostrado na Figura 3. A Tabela 2 apresenta os valores de velocidade do som obtidas nos ajustes de cada um dos 4 conjuntos e os respectivos χ^2 dos ajustes.

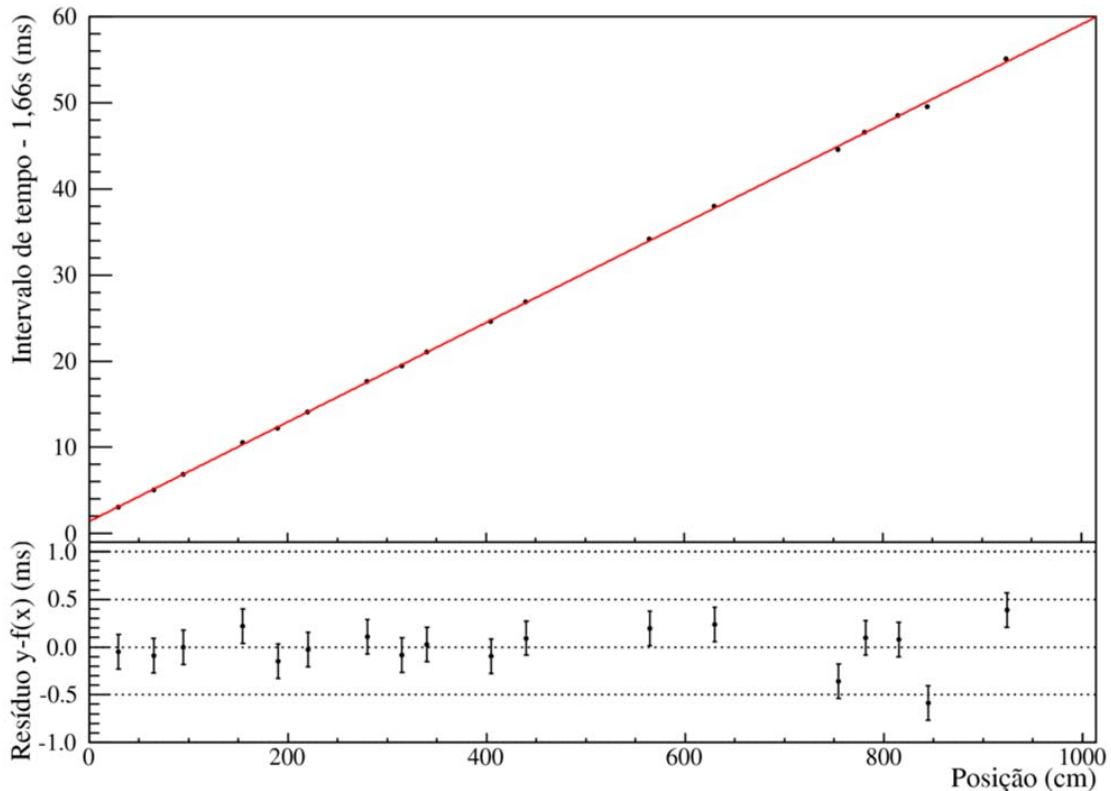


Figura 3 – Gráfico referente ao conjunto 4 do Teste 2 (18 celulares dispostos em linha), com a escala vertical deslocada de 1,66 s. Como as barras de erro são muito pequenas frente à escala vertical do gráfico, os resíduos (diferença entre os dados e a função ajustada) estão mostrados no painel inferior.

Tabela 02: Resultados do experimento feito com 18 celulares alinhados (Teste 2).

Conjunto	Velocidade do som (m/s)	χ^2 (16 graus de liberdade)
1 ($A_1 - B_1$)	$346,3 \pm 0,9$	25,9
2 ($A_2 - B_2$)	$345,1 \pm 0,9$	30,8
3 ($A_3 - B_3$)	$346,8 \pm 0,9$	16,0
4 ($A_4 - B_4$)	$346,9 \pm 0,9$	25,8

Os resultados mostrados na Tabela 2 são compatíveis entre si e tem precisão melhor a do Teste 1 ($\sigma_{v_s} \cong 0,9 \text{ m/s}$, com incerteza relativa de $\sim 0,3\%$) pois além da maior precisão nas medições de tempo, ainda a distância total medida foi maior ($\sim 9 \text{ m}$, contra $\sim 7 \text{ m}$ no Teste 1) e mais microfones foram usados neste teste (18 contra 6). A análise global do Teste 2 resultou em $v_s = (346,3 \pm 0,6) \text{ m/s}$.

Infelizmente as condições da sala não foram medidas, mas pela sensação térmica é possível estimar que a temperatura estava entre 20 e 25°C. De acordo com o INMET, a umidade relativa do ar na cidade de São Paulo no dia do experimento (2/set/2016) foi de 80% em média, com variação entre 60 e 90 %, o que implica que a velocidade do som pode estar no intervalo entre 344,1 m/s e 347,8 m/s. A precisão da velocidade do som obtida por esse método é tão grande que a temperatura pode ser estimada a partir da velocidade, resultado em $T = (23 \pm 1) ^\circ\text{C}$, quando se considera 80% de umidade relativa do ar.

IV - Conclusão

O procedimento apresentado neste trabalho permite a determinação da velocidade do som com grande precisão (incertezas relativas nos resultados finais de 0,7 % e de 0,2 %) com o uso de computadores ou celulares sem necessitar de qualquer adaptação ou circuitos auxiliares. Os testes descritos neste trabalho são bastante detalhados do ponto de vista de análise estatística e validam a utilização do método proposto até mesmo em disciplinas experimentais de Física em nível de graduação, onde a análise de dados precisa levar em consideração as incertezas envolvidas em algum nível. Porém, uma análise bem mais simples pode ser feita no ensino médio ou em disciplinas teóricas.

Uma modificação do uso deste procedimento pode ser o desenvolvimento de uma “*trena sonora*”: a equação (2) indica que se a velocidade do som for conhecida, o atraso sonoro possibilita medir a distância com incerteza $\sigma_{\Delta x} = \frac{v_s}{2} \sqrt{2} \sigma_{\Delta t} \cong 10 \text{ cm}$. No entanto, dúvidas sobre o valor da velocidade do som devidas a incerteza nas condições ambientais (temperatura e umidade relativa do ar) também afetam as distâncias calculadas e podem ser uma importante fonte de incerteza, especialmente no caso de distâncias grandes.

Referências

- AGUIAR, C. E.; PEREIRA, M. M., *O computador como cronômetro*, **Rev. Bras. Ensino Física** v.34, p.3303, 2012
- AGUIAR, C. E. *et al.*, *Medindo a velocidade do som com o microfone do PC*, In: **XVI Simpósio Nacional de Ensino de Física**, Rio de Janeiro, 2005; disponível em www.sbf1.sbfisica.org.br/eventos/snef/xvi/cd/resumos/T0064-2.pdf (acessado em 7/9/2016).
- AUDACITY (2000), Software, <http://www.audacityteam.org/> (acessado em 8/9/2016).
- BARBETA, V. B. *et al.*, *Experimento didático para determinação da Velocidade de propagação do som no ar, assistido por computador*, **Rev. Bras. Ensino de Física** v.22, p.447, 2000.
- CAVALCANTE, M. A. *et al.*, *O estudo de colisões através do som*, **Rev. Bras. Ensino Física** v.24, p.150, 2002.
- FONSECA, M. *et al.*, *O laboratório virtual: Uma atividade baseada em experimentos para o ensino de mecânica*, **Rev. Braz. Ensino Física** v.35, p.4503, 2013; FisFoto-IFUSP, <http://fep.if.usp.br/~fisfoto/> (acessado em 7/9/2016).
- GOOGLE (2006), *Google Sheets*, <https://www.google.com/sheets/about/> (8/9/2016).
- INMET, Instituto Nacional de Meteorologia (2012). *Séries históricas de estações meteorológicas*, http://www.inmet.gov.br/sim/gera_graficos.php (8/9/2016).
- NPL, National Physics Laboratory (2003). *Calculation of speed of sound in humid air*, <http://resource.npl.co.uk/acoustics/techguides/speedair/> (acessado 8/9/2016).
- NUSSENZVEIG, H. M. *Física Básica Vol. 2*, Edgard Blücher, São Paulo, 2ª ed, 1990.
- SUAIDE, A. (2011), *WebRoot*, <http://sampa.if.usp.br/webroot/> (acessado 8/9/2016).
- SUITS, B. H. (1998), *Physics of Music – Fraction of Air which is Water*, disponível em <http://www.phy.mtu.edu/~suits/WaterinAir.html> (acessado em 8/9/2016).