

Problema 12: Som contra fogo

Alice Jordão M. A. Carvalho, Heitor Nunes Silva, Pedro Magalhães F. Batista,
William Toshiyuki Kotsubo

(Xique Xique Guarulhos – Colégio Etapa)

2 de dezembro de 2024

Resumo

Neste relatório desenvolvemos o 12º problema da 38ª IYPT - Som contra fogo. Sob algumas condições é possível extinguir uma chama utilizando uma fonte sonora. Este relatório visa compreender como este fenômeno ocorre, e quais características do som e da chama afetam esse sistema. Sobretudo, relacionamos a extinção acústica ao fenômeno da ressonância e ao deslocamento da chama, sendo que com um deslocamento maior a chama é mais propícia a apagar.

1. Introdução

O som é definido pela oscilação das moléculas do meio pela transferência de energia. No ar, ele se manifesta deslocando as moléculas do ar gerando áreas de alta e baixa pressão, que o cérebro entende como ondas sonoras. Em contrapartida temos o fogo, uma reação exotérmica constituída por um combustível e um comburente.

A extinção do fogo através de ondas sonoras têm sido de interesse da comunidade científica em anos recentes devido às suas potenciais vantagens sobre outros métodos de combate às chamas, em especial o seu baixo impacto ambiental e fácil transporte.

Às diferentes condições experimentais se deve uma variedade de tipos de fogo. Em especial, as chamas pré-misturadas são aquelas em que o combustível é misturado previamente com o oxidante, e possuem uma combustão eficiente.

Para os diferentes tipos de fogo, há diferentes teorias para tratar delas. Podemos citar o trabalho de Kuldeep Prasad [4], que modelou a extinção de uma chama pré-misturada por uma análise química do problema. Usando as equações de Navier-Stokes para analisar as mudanças na chama, o autor realizou simulações do comportamento da chama e concluiu que a chama se desloca devido aos pulsos de pressão, de modo a equilibrar a taxa de perda de calor com a taxa de queima, até o ponto que não seja possível continuar a reação.

E, de fato, sabemos que a composição química do combustível é um parâmetro importante que ocasiona em diferentes comportamentos da chama; como ilustrado por Alan Alexander, o uso da acústica sob a combustão de diferentes misturas ocasiona em uma drástica diferença no comportamento das chamas e no tempo até extinção. [1]

Neste relatório, estudamos as chamas de difusão, mais especificamente com velas, definidas pela presença exclusiva do combustível, reagindo com o comburente presente no ambiente.

O mecanismo para que uma vela fique acesa é retroativo, de forma que o calor emitido pela chama age transformando a parafina em gás, para que a mesma se misture ao gás oxigênio e entre em combustão. E para que a vela se apague, o corpo da chama deve se afastar do pavio.

A análise realizada parte do entendimento que a chama será extinta por uma oscilação

na membrana do gerador de som. Tal oscilação será sentida como um "vento" contínuo pela chama, que irá se deslocar e será extinta sob certas condições.

Durante a Seção 2, trabalhamos a metodologia teórica do problema, investigando o mecanismo por trás da extinção acústica do fogo com base na literatura atual, que norteará a construção do nosso aparato experimental na Seção 3. Os resultados obtidos serão apresentados e discutidos na Seção 4 e, por fim, concluímos este relatório na Seção 5.

2. Fundamentos teóricos

Para a nossa análise, há três componentes relevantes a serem investigados: o aparelho produtor de som, o próprio som, e a chama que reside sobre uma vela. Constata-se na literatura que há dois deslocamentos de naturezas diferentes que atuam sobre a chama quando submetidas ao som: um vento, causado pelo movimento do diafragma da fonte sonora, e a amplitude da onda sonora, que por definição é o movimento máximo que uma molécula de ar realiza sob a ação do som.

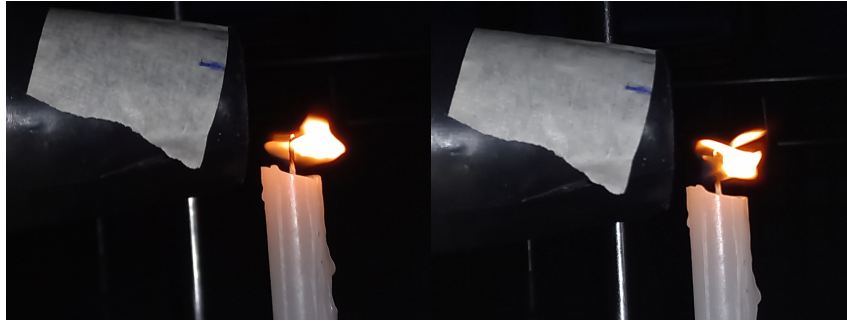
Podemos, por meio de dois experimentos simples encontrados na literatura, constatar que os dois elementos são necessários simultaneamente para a extinção acústica da chama.

O primeiro experimento consistiu no isolamento do vento, sem o fator sonoro. Para isso, comparamos o comportamento da chama sob (a) o aparato e (b) um cooler (figura 1).

Nota-se que os mecanismos de extinção são diferentes ao perceber, no primeiro caso, a turbulência da chama, e no segundo, sua ordem e extinção. [2].

O segundo experimento consistiu, então, no isolamento do som, impedindo a interação do vento realizado pelo diafragma com o fogo usando uma pequena membrana para separar a vela do aparato experimental. Sob essas condições, confirmamos que a vela se mantém laminar. [6] Embora não normalizemos a intensidade para os dois casos, a análise com o aplicativo *Phyphox* revelou uma diferença insignificante entre os casos com o painel e sem (figura 2).

Assim, concluímos que o mecanismo por trás da extinção acústica da chama é resultado da combinação dos dois fatores. Usaremos como base o mecanismo proposto por Friedman et. al para compreender então o fenômeno. [2]



(a)



(b)

Figura 1: Experimentos com (a) o aparelho sonoro com cone comparados com (b) o cooler. Nas duas primeiras imagens, repare o movimento caótico da chama e, nas duas últimas, o movimento regular da chama. Embora os dois sejam capazes de apagar a chama, é evidente que os mecanismos por trás da extinção são diferentes.



(a)



(b)

Figura 2: Experimento mostrando o impacto dos painéis sob o comportamento chama para uma mesma configuração experimental. Sem nenhum painel, a vela se apaga. Em (a), há somente um painel que, embora apazigue o efeito, não o controla completamente. Em (b), há quatro painéis, que então mantinham-na laminar com uma sutil vibração.

Segundo o autor, há dois principais ciclos que mantêm a chama acesa: um ciclo que caracteriza a propensão do combustível de se retroalimentar, ou seja, de conseguir mais combustível, caracterizado por um número de Spalding (B); e outro que consiste no aumento/diminuição da temperatura do leito de combustível, caracterizado por um número de Nusselt local (Nu_ℓ).

Este último ciclo seria afetado pelo uso da acústica, iniciando dois processos de naturezas opostas: um que consiste no aumento da temperatura do leito de combustível devido à exposição a mais oxigênio pelo seu deslocamento, e outro que consiste no esfriamento devido à sua exposição ao ar frio. Nesse modelo, o papel do som seria de expôr o pavio da chama com oscilações periódicas.

Assim, quando a pressão acústica e a velocidade do ar são baixos o suficiente tal que o processo de transporte é predominante, há aumento da temperatura do pavio; mas há um certo nível depois do qual a temperatura começa a diminuir, propiciando a extinção a chama.

Ele propõe, então, que há uma constante universal que relaciona esses dois fatores no ponto de extinção acústica, dado por:

$$\theta_A = \frac{Nu_\xi}{B} \quad (1)$$

3. Procedimento experimental

Inicialmente, o nosso experimento (Figura 3) consistia dos seguintes equipamentos: um amplificador de som Onerr Block 20 Bass 115V, usado para intensificar o som; um celular Galaxy A52s, usado para fornecer as ondas sonoras; e uma vela, que fornece a chama usada para o estudo em si.



Figura 3: Aparato inicial.

Fizemos experimentos variando a frequência e a distância entre a membrana e a vela. Porém, após uma análise das capacidades do amplificador, constatou-se que ele por si só não era capaz de extinguir uma chama, apesar de gerar uma inclinação na chama para algumas condições experimentais (Figura 4).



Figura 4: Note que ele somente a curva, embora as condições sejam propícias para a extinção. Assim, foi necessária uma adaptação do aparato.

Sendo então que também acoplamos um cone de plástico - daqui em diante, colimador - para aumentar a intensidade do som sob a chama, como sugerido por Alan A. [1] Dessa forma, obtemos resultados mais potentes sob as mesmas condições (Figura 5).



Figura 5: Aparelho completo com a adição do colimador.

3.1. Cuidados experimentais

Para garantir maior acurácia nos dados coletados, alguns cuidados mais específicos foram tomados.

Os primeiros experimentos consistiram na análise de diversos fatores que poderiam interferir com os resultados. O primeiro fator foi a distância da vela até a fonte sonora; sobre este, mantemos a distância constante ao longo de cada experimento feito. O experimento foi feito em uma sala fechada, sem passagem de correntes de ar, naturais ou geradas por ventiladores/ar-condicionado. E para lidar com a influência do volume, padronizamos o ganho e o volume do aparelho sonoro em todos os experimentos e o volume do celular (gerador das frequências) no máximo, sendo as ondas todas senoidais.

Outra dificuldade enfrentada nos experimentos foi de que a altura da vela em relação ao cone foi variando enquanto derretia, de forma a mudar o desempenho do aparato. Para contornar a situação, realizamos os experimentos em curtos períodos de tempo para garantir a uniformidade da sua altura, com o pavio inicialmente estando acima do centro da circunferência do cone.

Por fim, nosso último experimento consistiu na coleta de dados sobre a intensidade. Devido à sua relação com o quadrado da amplitude e da frequência, ela pode fornecer dados importantes sobre as ondas. Foi constatado que a diferença da intensidade na ordem de grandeza de centímetros é muito baixa, então não a consideramos na análise. [3]

3.2. Coleta de dados

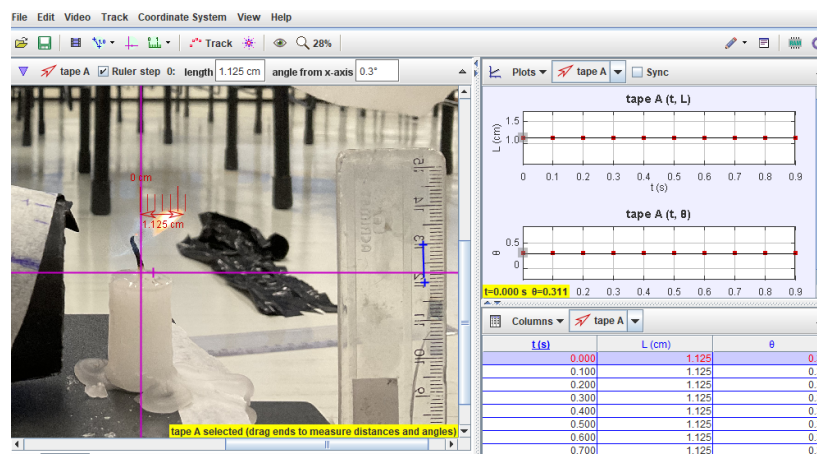


Figura 6: Captura de tela do *software* Tracker para análise do deslocamento da chama

A coleta de dados consistiu da análise de um único instante da chama, sendo o deslocamento da chama definido como a distância horizontal entre o pavio e a ponta mais a direita da chama. Estes dados foram analisados pelo *software Tracker* (Figura 6).

4. Resultados e discussão

As condições experimentais deveriam garantir que, para todas as frequências de som deveria haver uma intensidade uniforme, o que não foi verificado (Figura 7). Entendemos que isso se deve a uma limitação do aparelho em emitir na faixa de ultrassom e que, portanto, os dados tomados sob essas frequências podem ser menos acuradas.

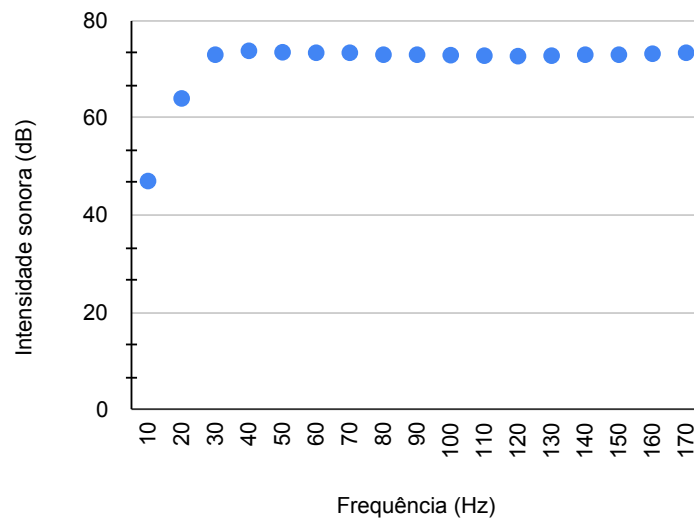


Figura 7: Resultados da intensidade sonora pela frequência.

Após compreender a relevância do deslocamento da chama para a extinção, este fator foi analisado com a mudança da frequência sonora (Figura 8). As frequências estudadas foram de 10Hz a 160 Hz em passos de 10 em 10 Hz, a uma distância de 5cm do diafragma.

O gráfico acima foi feito com os dados retirados do aparato inicial - sem o colimador. Para todas as frequências estudadas não houve extinção sonora, mas entre 80Hz e 120Hz há um pico de deslocamento da vela, indicando que neste intervalo a extinção é favorecida.

Uma análise semelhante com o cone foi então realizada, analisando o deslocamento da chama em cada frequência a uma distância de 2cm do cone (Figura 9).

Nas frequências de 10Hz e 20Hz, a chama se manteve laminar, enquanto nas frequências acima de 80Hz ela se apagou.

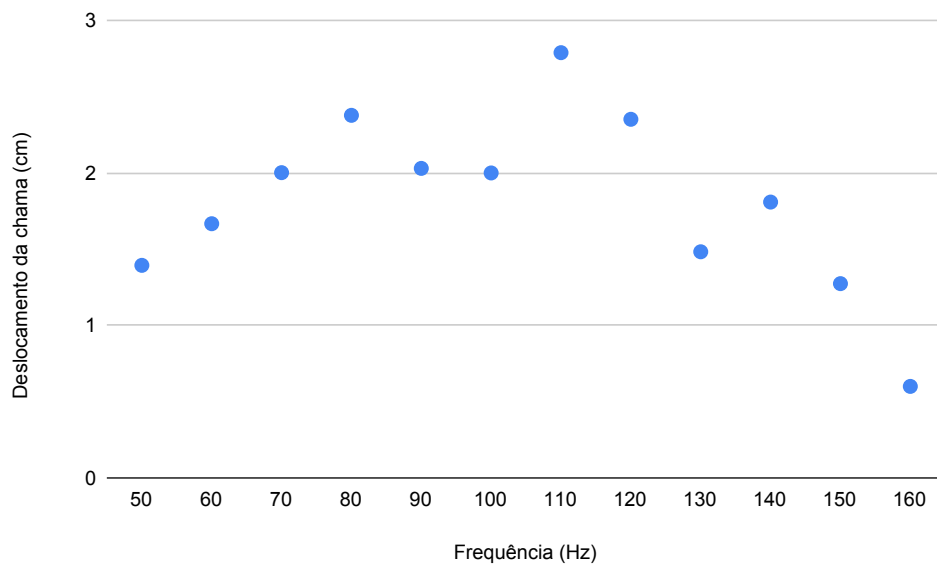


Figura 8: Resultados de deslocamento da chama por frequência com o aparato inicial.

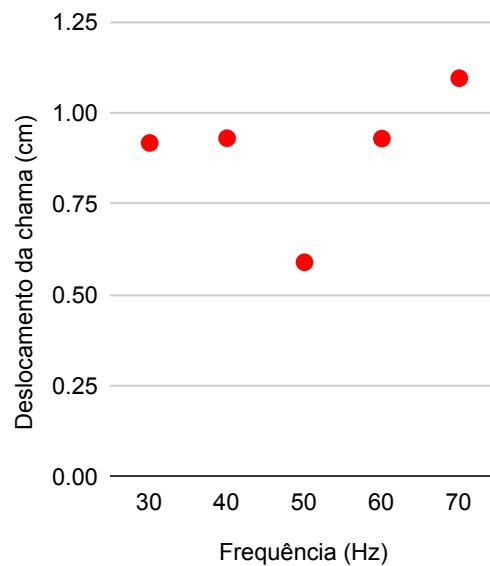


Figura 9: Resultados de deslocamento da chama por frequência com o aparato com o colimador.

Por fim, a análise geral de frequência por deslocamento para os casos em que havia extinção ou não no aparato com o colimador foi da forma:

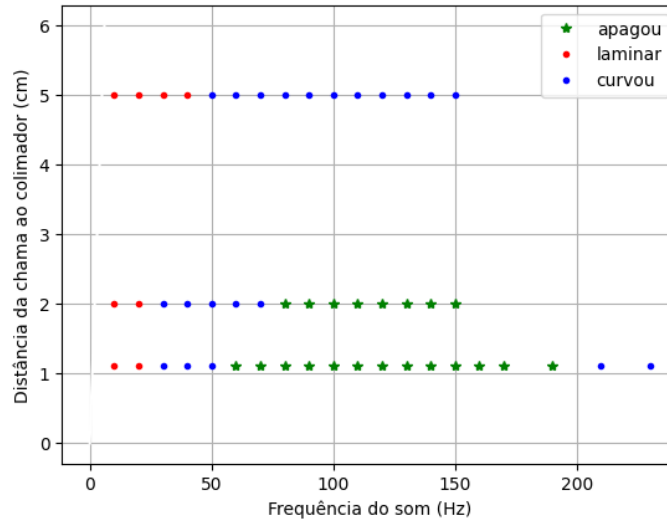


Figura 10: Gráfico de distância por frequência.

5. Conclusão

Ao longo deste relatório, o objetivo foi de entender os mecanismos por trás da extinção acústica do fogo e realizar experimentos para confirmar os resultados presentes na literatura. Embora com graus variados de sucesso, conseguimos analisá-la para aprimorar e interpretar nossos resultados, confirmamos a existência de mecanismos diferentes de extinção entre o aparelho sonoro e o vento, e verificamos a ineficácia do som puro.

Durante os testes com o aparato experimental, foi constatado que uma mudança no ambiente poderia drasticamente afetar o seu desempenho, havendo uma direta relação com a ressonância da sala, chegando a contradizer os resultados na literatura de que uma frequência menor sempre será mais propensa a extinguir. [5][2].

O gráfico apresentado na Figura 8 com deslocamento por frequência ilustra essa relação ao passo que, embora esse parâmetro por si mesmo não consiga prever a extinção com certidão, é um bom indicador. Nesse caso, percebe-se que foram as frequências entre 80 e 120Hz que tiveram os melhores resultados.

Percebemos também que o uso do colimador teve um efeito pronunciado sobre o desempenho do aparato, como constatado na literatura. [1] Concluimos que essa pode ser outra técnica capaz de aumentar a sua efetividade em situações práticas de combate a chamas.

Os experimentos foram limitados no seu escopo ao somente analisar o efeito de variações de

frequência sob o deslocamento e sob a intensidade sonora, podendo ser interessante realizar análises variando a distância da vela ao som, o volume do som, e possivelmente usando salas e/ou colimadores com ressonâncias específicas para estudar o efeito do fenômeno sob o desempenho do aparelho. Também podemos variar os tipos de combustíveis usados, estudando as diferenças entre estados físicos e diferenças entre composições químicas.

A análise teórica também não foi compreensiva ao realizar somente uma análise de alto nível do problema, sem expressar e entender o problema de maneira matemática. Para conseguir compreender melhor o problema, será necessário uma análise muito mais rigorosa em cima das interações entre os fluidos e os parâmetros relevantes.

No futuro, buscamos aprimorar nosso equipamento e aprofundar a teoria por trás da extinção acústica da chama para permitir análises e experimentos mais diversificados.

Referências

- [1] Alan Arulandom Alexander. Study of sound wave as a flame extinguisher. Não publicado, 2015. URL <https://utpedia.utp.edu.my/id/eprint/15706/>.
- [2] Adam N. Friedman and Stanislav I. Stoliarov. Acoustic extinction of laminar line-flames. *Fire Safety Journal*, 93:102–113, 2017. ISSN 0379-7112. doi: <https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2017.09.002>. URL <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0379711216302338>.
- [3] Resnick Halliday. *Fundamentos de Física - Gravitação, Ondas e Termodinâmica*. LTC, 2023. ISBN 9788521637233.
- [4] Kuldeep Prasad. Interaction of pressure perturbations with premixed flames. *Combustion and Flame*, 97(2):173–200, 1994. ISSN 0010-2180. doi: [https://doi.org/10.1016/0010-2180\(94\)90004-3](https://doi.org/10.1016/0010-2180(94)90004-3).
- [5] Caiyi Xiong, Yanhui Liu, Haoran Fan, and Xinyan Huang. Fluctuation and extinction of laminar diffusion flame induced by external acoustic wave and source. *Scientific Reports*, 11(1), 2021. doi: <https://doi.org/10.1038/s41598-021-93648-0>.
- [6] Caiyi Xiong, Zilong Wang, and Xinyan Huang. Acoustic flame extinction by the sound wave or speaker-induced wind? *Fire Safety Journal*, 126:103479, 2021. ISSN 0379-7112. doi: <https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2021.103479>. URL <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0379711221002216>.