



Física, química e eletrônica: Compreendendo a combustão e o movimento de um foguete de garrafa PET

.....

Tiago Destéffani Admiral^{1,*}
Paulo José Pereira de Oliveira²
Fabielle Castelan Marques²

¹Mestrado Nacional Profissional em Ensino de Física, Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Fluminense, Campos dos Goytacazes, RJ, Brasil.

²Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Fluminense, Cachoeiro de Itapemirim, ES, Brasil.

RESUMO

Um experimento muito difundido para ilustrar a terceira lei de Newton é o do foguete, feito de garrafa PET, movendo-se retilineamente ao longo de um barbante, propelido pela combustão de álcool 70%. Além de ser extremamente barato, também é versátil, pois pode ser feito dentro de uma sala de aula, e exatamente por isso tem sido um valioso experimento demonstrativo nas aulas de física. Entretanto, não encontramos na literatura uma investigação mais detalhada, do ponto de vista interdisciplinar, sobre esse movimento. Por essa razão, nosso trabalho teve por objetivo analisar a dinâmica do movimento a fim de compreender a forma da aceleração $a(t)$ para esse movimento, além de realizar uma análise química dos fenômenos ocorridos na câmara de combustão do foguete. A metodologia do trabalho envolveu embarcar um acelerômetro (MPU6050) na garrafa PET e utilizar o Arduino para realizar as medidas de aceleração instantânea durante o movimento. Os resultados indicaram que o comportamento da função $a(t)$ mostrou-se mais complexo que o esperado, devido, em grande parte, à natureza não uniforme da combustão do álcool.

Palavras-chave: Arduino; foguete; aceleração

.....

1. Introdução

É comum, como professores de física e química, utilizarmos experimentos mais simples, de caráter demonstrativo, para ilustrar alguns fenômenos. De maneira geral, a abordagem que se faz em torno desses experimentos possui um caráter apenas conceitual. Esse é o caso do experimento do foguete feito com garrafa PET e álcool, conectado por meio de aros a um barbante esticado horizontalmente. O professor coloca álcool dentro da garrafa, fecha a tampa e coloca uma chama próxima ao orifício feito previamente no fundo da garrafa. Como resultado da combustão dos gases, o foguete movimenta-se horizontalmente. Entretanto, com novas ferramentas tecnológicas à disposição, podemos revisitar esse experimento e realizar uma análise um pouco mais profunda sobre a dinâmica de seu movimento.

A utilização de tecnologias de informação e comunicação (TICs), além de ser considerada uma estratégia vantajosa para a educação [1], também é indicada nos documentos oficiais de regulamentação do ensino [2].

Ainda sobre essas regulamentações [2], podemos destacar o aspecto interdisciplinar da compreensão dos fenômenos; em nosso caso, o conhecimento de química foi essencial para a compreensão da origem do movimento. Em problemas de física, é comum que o contexto da origem do movimento seja negligenciado, de forma que o aluno fica geralmente com a análise restrita à cinemática do movimento. A partir de

uma perspectiva investigativa, a visão sobre o fenômeno como um todo fica mais ampla, permitindo análises antes impossíveis.

Em nosso trabalho, utilizamos a plataforma Arduino, que possui característica *open source*, além de ser extremamente acessível. Essa plataforma vem sendo utilizada recorrentemente como apoio em atividades experimentais de física [3-5] e apresenta resultados experimentais aceitáveis para propósitos didáticos [6].

Uma pesquisa na literatura em revistas voltadas para o ensino de física mostrou que existem alguns trabalhos que abordam experimentos [7,8] relacionados ao que abordamos neste artigo, entretanto sem uma análise quantitativa. Em alguns trabalhos [9,10], percebemos que o Arduino é utilizado para automatizar a plataforma de lançamento do foguete de garrafa PET, mas não para monitorar o movimento do fo-

guete.

Um dos trabalhos encontrados na literatura [7], no qual o foguete projetado a partir de garrafa PET utiliza vinagre e bicarbonato de sódio para gerar o movimento, o principal objetivo foi investigar a viabilidade de medir a aceleração, por meio do Arduino e de um acelerômetro fixado no foguete. Os testes iniciais com o acelerômetro e o cartão de memória para gravação de dados mostraram-se promissores, de acordo com os autores, embora não tenham sido apresentados resultados quantitativos. No outro trabalho mencionado [9], os autores apresentaram uma plataforma automatizada de lançamento de

Podemos destacar o aspecto interdisciplinar da compreensão dos fenômenos; em nosso caso, o conhecimento de química foi essencial para a compreensão da origem do movimento

*Autor de correspondência. E-mail: tdesteffani@gmail.com.

foguete de garrafa PET. Eles utilizaram o Arduino para realização do acionamento eletromecânico e o sistema permitiu a realização de lançamentos oblíquos para quaisquer ângulos entre 0° e 90°. De forma similar, outro trabalho [11] apresentou um manual de construção de foguetes de garrafas PET, sua base de lançamento e os respectivos procedimentos de segurança envolvidos durante o lançamento.

Dos trabalhos encontrados na literatura, dois [12,13] destacaram-se por realizar uma abordagem quantitativa da dinâmica dos foguetes. Em um deles [12], os autores mediram o coeficiente de arrasto do ar para baixas velocidades de foguetes de garrafa PET propelidos a água e ar comprimido por meio de dois experimentos: lançamento oblíquo e vertical (queda livre). O outro trabalho [13] descreveu o desenvolvimento de um sensor de velocidade para medir a velocidade de lançamento de um foguete de garrafa PET que utiliza a pressão da água para gerar empuxo.

Por fim, não encontramos nenhum trabalho na literatura que tenha abordado o mesmo experimento que pesquisamos em nosso artigo, que se propõe a analisar o movimento de um foguete, feito com garrafa PET, em um movimento retilíneo horizontal.

2. Materiais e métodos

Os materiais necessários para a montagem do experimento, bem como

seu custo de aquisição, estão mostrados na Tabela 1.

A montagem do experimento consiste em amarrar firmemente o barbante em um local protegido do vento, a uma certa altura do chão (em nosso caso, essa altura foi de 1,73 m) em dois suportes firmes (em nosso caso, foram colunas da estrutura do edifício), formando uma linha reta e horizontal. É imperativo que as extremidades do barbante fiquem bem niveladas horizontalmente.

Para montar o foguete, é necessário limpar e secar bem a garrafa PET. Feito isso, devemos fazer um furo usando uma broca de 6,0 mm no fundo da garrafa, bem centralizado. O suporte que sustentará o foguete em seu movimento ao longo do barbante pode ser feito com pedaços de fio rígido (em nosso caso, fio de cobre 18 AWG) ou de arame. O fio deve ser dobrado de forma que uma extremidade forme um aro (que será colocado para correr pelo barbante) e a outra extremidade tenha uma parte dobrada perpendicularmente. Essa segunda extremidade é fixada na garrafa por meio de fita isolante. A Fig. 1(a) mostra o foguete no suporte e a Fig. 1(b) mostra o detalhe do furo no fundo da garrafa. Essa estrutura já é suficiente para a parte mecânica do projeto.

A parte eletrônica é composta pelo Arduino Mini 3,3 V, o sensor MPU6050 e o cabo de interfone. O cabo de interfone, de densidade linear $9,3 \pm 0,05$ g/m,

possui quatro vias; uma das extremidades do fio deve ser soldada diretamente na placa do Arduino e a outra, diretamente no MPU6050. O diagrama de conexão é mostrado na Fig. 2.

Como o Arduino é um produto *open source*, seu hardware é livre e pode ser fabricado por qualquer empresa. Dessa forma, existem várias placas compatíveis no mercado, todas comercializadas com o mesmo nome, “Arduino Mini”, porém com pequenas diferenças. Sendo assim, a informação de conexão dos pinos é mostrada na Tabela 2.

Entretanto, é essencial observar o critério de que a placa possua nível lógico 3,3 V, para que seja compatível com o MPU6050. Alguns trabalhos encontrados na literatura [7] utilizam placas de Arduino de nível lógico 5,0 V junto com esse sensor, mas essa prática acarreta erros de leitura, podendo até mesmo causar danos irreversíveis ao sensor.

Perceba que na Tabela 2 existe uma conexão extra entre o *Gnd* do Arduino e o pino *ADO* do MPU6050. O pino *ADO* precisa estar obrigatoriamente em nível lógico baixo, por isso deve permanecer ligado ao *Gnd*. Para solucionar isso, sem precisar levar mais uma via de cabo ao Arduino, basta soldar um pedaço de fio no próprio MPU6050, ligando diretamente o pino *ADO* ao *Gnd* do próprio sensor.

Uma vez conectados todos os fios, basta fixar o MPU6050 ao foguete. Em nosso equipamento, usamos um peque-

Tabela 1: Relação de materiais e custos aproximados.

Quantidade	Material	Custo unitário aproximado (R\$)
1	Garrafa PET	-
1	Arduino Mini (3.3 V)	24,00
1	Sensor - MPU6050 acelerômetro	16,00
20,0 m	Cabo de interfone - Quatro vias	0,60
20,0 m	Barbante	0,20

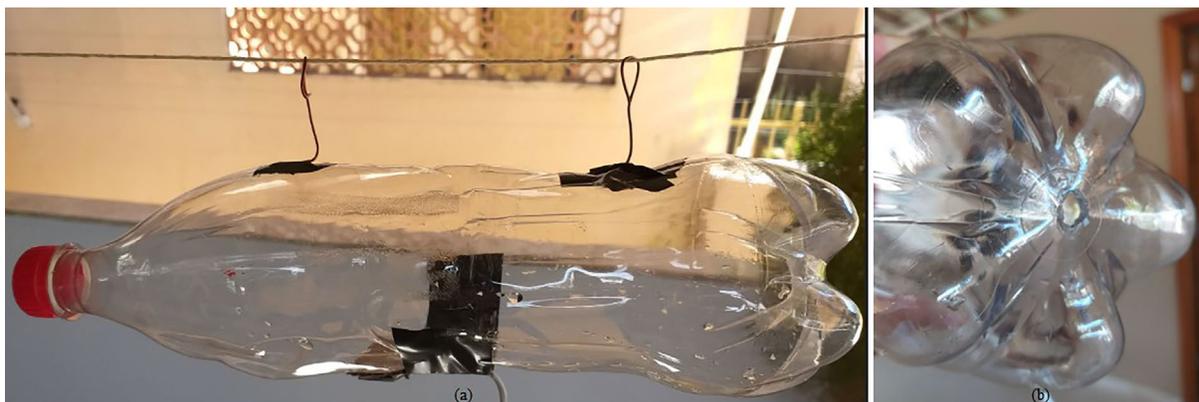


Figura 1 - a) Foguete já acoplado ao barbante e b) detalhe do furo no fundo do foguete.

Tabela 2: Conexão dos fios entre o Arduino e o MPU6050.

Pino no Arduino	Pino correspondente no MPU6050
Vcc	Vcc
Gnd	Gnd
A4	SCL
A5	DAS
Gnd	ADO

no pedaço de fita dupla face para prender o sensor a um pedaço de papelão retangular de 5,0 cm x 4,0 cm; só então usamos a fita isolante para prender o pedaço de papelão junto com o sensor e uma parte dos fios junto à garrafa. Os testes feitos com o sensor preso ao pedaço de papelão e fita dupla face permitiram melhores resultados, devido à melhor fixação e à redução de vibração no sensor. O sensor fixado à garrafa é mostrado na Fig. 3.

O principal critério a ser observado

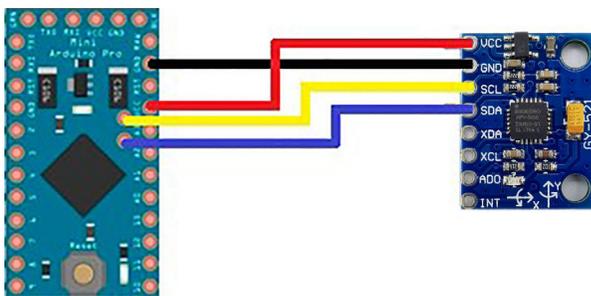


Figura 2 - À direita, a placa do Arduino e à esquerda, o sensor MPU6050.

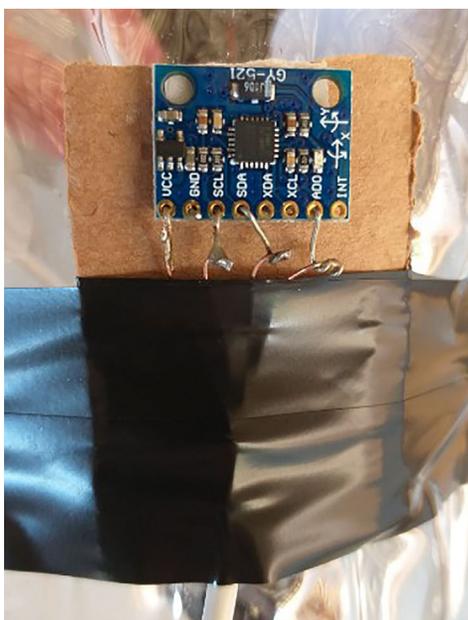


Figura 3 - Sensor fixado à garrafa.

ao fixar o sensor à garrafa é o alinhamento do eixo *x* paralelamente ao barbante. O sensor MPU6050 é capaz de medir a aceleração individualmente em três direções distintas. Como estamos interessados em analisar o movimento ao longo de um eixo específico, devemos alinhar o sensor para que ele meça a aceleração nessa direção específica. Para realizar o alinhamento do sensor, basta orientar-se pela inscrição gravada na própria placa, que pode ser vista no canto direito do sensor, na Fig. 3.

Após a conexão dos fios e do acoplamento do sensor à garrafa, carregamos no ambiente de programação (IDE) do Arduino o código mostrado no Material Suplementar.

Como mencionado, uma busca na literatura mostrou alguns trabalhos que tentaram explorar o movimento de foguetes didáticos, mas que não obtiveram sucesso na descrição completa do movimento.

Um dos problemas para a realização da medição da aceleração [7] diz respeito ao posicionamento do sensor no foguete. Os autores realizaram um lançamento oblíquo do foguete, de modo que o acelerômetro acoplado à garrafa não contava com alinhamento dos eixos, uma vez que a trajetória do foguete ao ar livre estava sendo influenciada pela resistência do ar e pela velocidade relativa do vento. Logo, os dados coletados não permitiram uma modelagem exata da aceleração nos eixos cartesianos, mas apenas uma estimativa do módulo da aceleração em alguns instantes específicos. Esse problema é contornado em nossa metodologia, uma vez que o movimento do foguete fica restrito a um eixo apenas.

Um outro problema encontrado na literatura [7] foi a tentativa de utilização de cartão SD para gravação dos dados de aceleração. A placa do Arduino até possui um espaço em memória

para gravação de dados, chamado de memória EPROM, porém esse espaço é extremamente pequeno e não comporta uma grande quantidade de informações. Entretanto, a utilização do módulo de cartão SD, que dispensaria a utilização dos fios até o sensor, mostrou-se ineficaz em nossos testes, devido ao fato de que o tempo de gravação dos dados no cartão SD era muito grande em relação à janela de coleta de dados que obtivemos.

A reação de combustão do álcool no foguete ocorre dentro de um intervalo de tempo menor que 1 s, de modo que utilizando o método de gravação no cartão SD não conseguiríamos realizar mais que 20 medidas durante o movimento. Já com o fio ligado diretamente, fomos capazes de medir em intervalos de 10 ms. Perceba que aplicativos de captura de vídeo, como o *VidAnalysis*, por exemplo, utilizam uma taxa de captura de 33 ms, ou seja, nosso programa possui uma resolução três vezes maior.

Outra possibilidade que foi testada foi a de embarcar o “computador” junto com o foguete. Em nosso caso, o papel de computador foi feito pela placa RaspberryPi® 3B. Essa placa, diferentemente do Arduino, é um microprocessador, o que significa que possui alto poder de processamento, podendo ser utilizada como um computador quando carregada com seu software nativo Raspbian.

Fizemos o teste carregando o programa do Arduino dentro da RaspberryPi e conectando a placa, uma bateria para alimentação, a placa Arduino Mini e o acelerômetro, tudo isso dentro de uma caixa plástica que foi presa à garrafa. Entretanto, devido à massa elevada ($378,3 \pm 0,05$ g), o sistema de propulsão não foi capaz de acelerar o conjunto. Vale ressaltar que a massa total do conjunto que usamos apenas com o acelerômetro é de ($48,2 \pm 0,05$ g), cerca de oito vezes menor.

3. Resultados e Discussões

Foram realizados um total de 10 experimentos. Para cada experimento individual, foram obtidas 38 medidas de aceleração, em intervalos de tempo de aquisição de 10 ms. Na Fig. 4, são mostrados quatro gráficos da aceleração vs. tempo de alguns experimentos.

Note que as curvas apresentam um comportamento similar, um pico inicial e depois um segundo pico a partir do qual decai até a saturação. Embora esses quatro gráficos sejam apenas exemplos, os demais apresentaram compor-

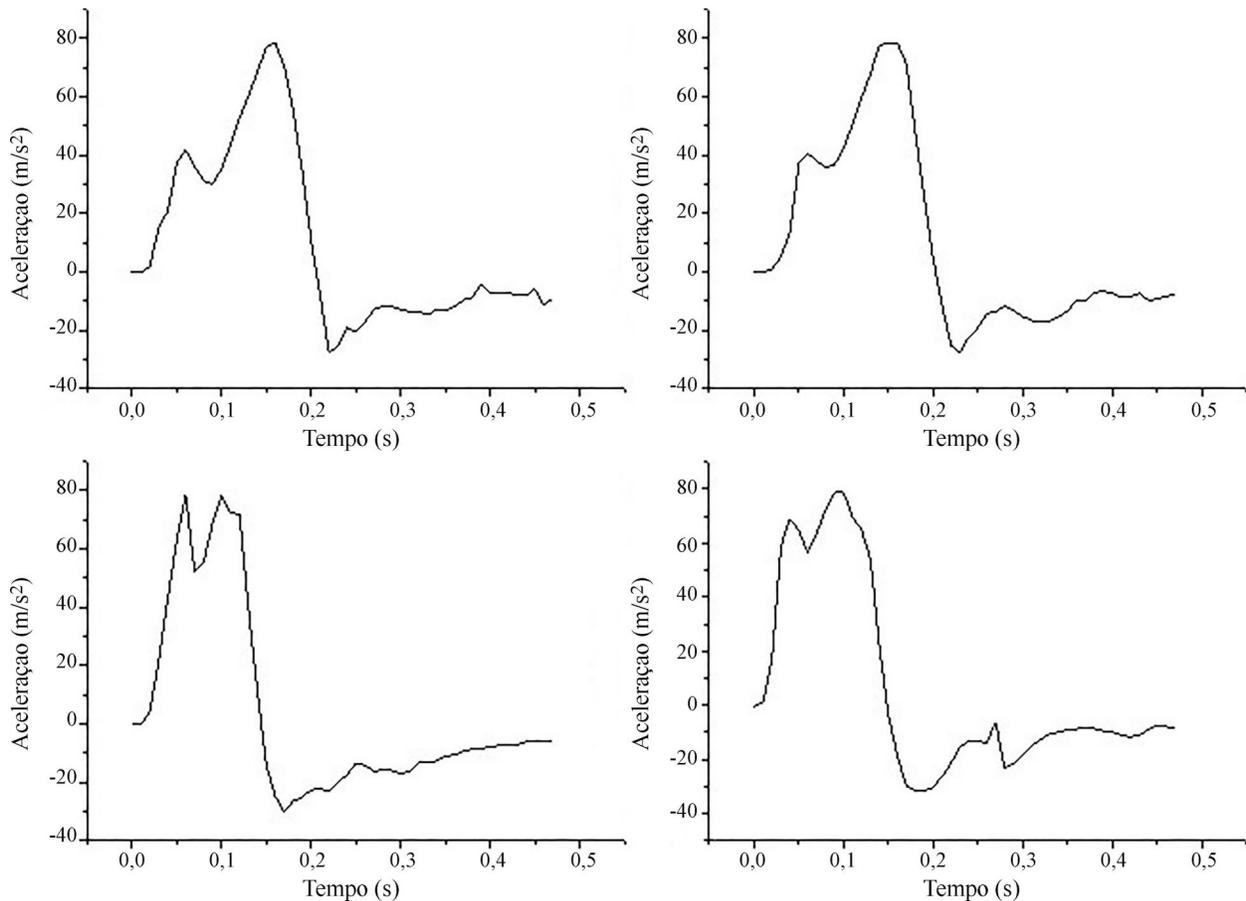


Figura 4 - Exemplos de gráficos da aceleração em função do tempo.

tamento similar. Nós esperávamos um único pico, ou seja, que a aceleração atingisse um valor máximo e depois fosse diminuindo até chegar a zero. Esse primeiro pico inesperado, que é mais íngreme em alguns gráficos, deve-se, de maneira geral, à combustão não linear do álcool nos momentos iniciais do experimento. A combustão ocorre de maneira que, durante o processo, parâmetros como umidade, concentração do comburente, pressão e temperatura, por exemplo, variam. Por essa razão, a taxa de queima não apresenta um aspecto constante, como será discutido mais adiante.

Os dados nos permitiram associar a combustão do álcool com a aceleração; analisando os dados das 10 medidas, podemos destacar algumas análises sobre o movimento. O intervalo de tempo entre os dois picos de combustão, em média, foi de aproximadamente $(0,1 \pm 0,02)$ s.

Com a ajuda do software Origin 8.5,

também realizamos a medida da aceleração média da garrafa, enquanto ocorria a combustão do álcool. A determinação da aceleração média pode ser obtida pela Eq. (1):

$$a_m = \frac{\int_0^t a(t).dt}{\Delta t}. \quad (1)$$

Como não possuímos uma função analítica $a(t)$ para descrever o movimento, utilizamos uma ferramenta numérica para determinar a área sob a curva dos gráficos, observando o intervalo para o qual $a > 0 \text{ m/s}^2$. O valor médio obtido foi de $(42 \pm 2) \text{ m/s}^2$. Um exemplo desse cálculo é mostrado na Fig. 5.

Fizemos o recorte desse intervalo, em particular, porque a partir do momento em que se encerra a combustão os gráficos apresentam comportamentos com padrão pouco definido. Com essa análise percebemos que, para as mesmas condições iniciais, as veloci-

dades médias durante a combustão foram similares em todos os experimentos, o mesmo valendo para o intervalo de tempo entre os picos das combustões, como pode ser visto na Tabela 3.

Observando os dados da Tabela 3, concluímos que as medidas apresentaram um desvio padrão $\sigma \approx 1,75$ e um erro padrão aproximado $\delta \approx 0,6 \text{ s}^2$. Vale ressaltar que em todos os casos foi utilizado o mesmo padrão de cálculo mostrado na Fig. 5.

Após o consumo de todo o comburente, não há mais a força propulsora do foguete, dessa forma começamos a observar valores negativos de aceleração. Esses valores adquirem sinal negativo, pois, após cessada a combustão, apenas a força de atrito e a resistência do ar atuam na direção do movimento. Como elas atuam no sentido oposto ao do movimento, observam-se valores de desaceleração ($a < 0$).

Sobre essa análise, podemos observar que num primeiro momento essa

Tabela 3: Medidas de aceleração obtidas.

Medida	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Aceleração (m/s^2)	42	39	43	41	42	42	44	39	44	42

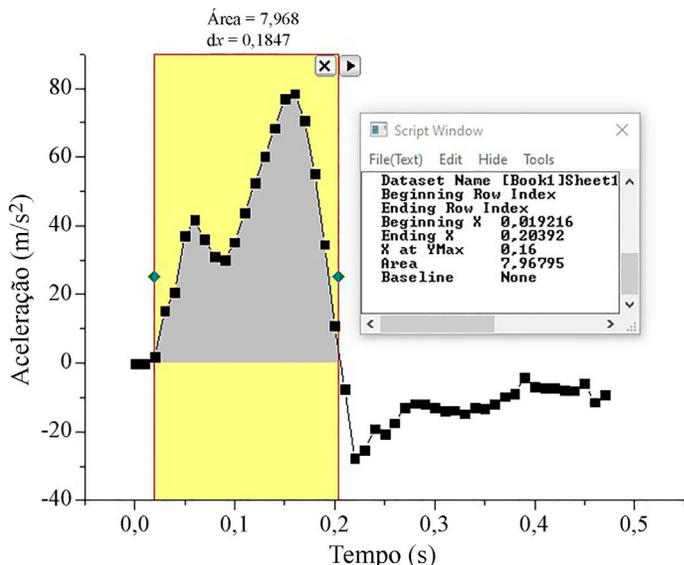


Figura 5 - Determinação da aceleração média da garrafa PET durante o período de combustão.

desaceleração é mais acentuada, e posteriormente assume valores mais estáveis. Isso ocorre, em parte, porque imediatamente após acabar a reação de combustão o foguete atinge sua velocidade máxima; como sua massa é relativamente baixa, a força de arrasto torna-se significativa. Após uma brusca redução de velocidade, o fator de arrasto torna-se menos significativo no movimento, tornando a força de atrito a principal fonte de desaceleração.

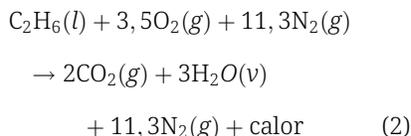
Ainda sobre o atrito, é comum utilizarmos uma generalização, tornando constante o coeficiente de atrito. Essa generalização nos ajuda a determinar o módulo da força de atrito para um sistema que preserve essa propriedade. Entretanto, na prática, e em nosso caso em particular, pequenas imperfeições no barbante, regiões ligeiramente mais lisas ou mais irregulares, podem conferir uma força de atrito ligeiramente diferente em pontos diferentes do barbante. Por isso, nossa medida restringiu-se a determinar o valor de aceleração média no intervalo de tempo da combustão.

4. Análise físico-química da combustão

Os dispositivos que permitem transformar certa quantidade de calor em trabalho são chamados de máquinas térmicas, que podem ser classificadas como de combustão interna ou externa. Os motores a combustão interna são uma subclassificação das máquinas térmicas, máquinas que transformam a energia térmica em energia mecânica

útil [14]. É da combustão da mistura combustível-comburente que provém a energia térmica, e esta acontece internamente, no caso destes motores, ou seja, existe uma câmara dentro do motor para que o fenômeno ocorra.

A combustão é uma reação exotérmica, ou seja, ocorre uma rápida reação de oxidação e o calor é liberado no curso dessa reação química. Ela é, portanto, responsável por liberar ou converter a energia química armazenada no combustível em energia térmica [15]. O dispositivo do presente projeto é classificado como máquina térmica de combustão interna por impulso; nesse caso, o trabalho é obtido pela força de reação de combustão do etanol (C_2H_6O) e a propulsão se dá pelos gases expelidos em alta velocidade pelo orifício, conforme a Eq. (2):



A reação é rápida e o aquecimento dos gases de escape produz alta pressão na

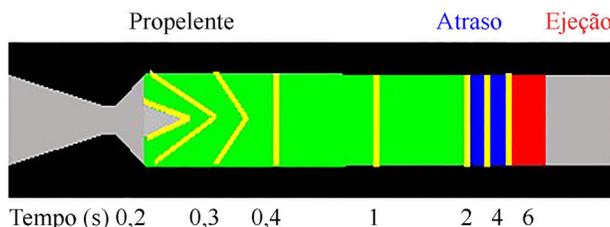


Figura 6 - Combustão do propelente dentro da câmara de combustão [16].

garrafa. O gás de exaustão é empurrado para fora do orifício e isso produz o impulso, conforme descrito pela terceira lei de Newton. Os vários processos físicos e químicos que ocorrem durante a operação de um motor-foguete real são altamente complexos. Esses processos incluem as reações químicas complexas que ocorrem durante a combustão; a maneira como ocorre o “consumo” do grão-propelente durante a queima; o comportamento dos gases de exaustão – como eles se formam na superfície de queima, viajam através da câmara e saem através do orifício –; a interação entre os gases de exaustão e partículas condensadas (fumaça).

O impulso de qualquer motor de foguete depende da velocidade e da quantidade de gás de escape quente que passa pelo orifício. A superfície flamejante é chamada de frente da chama. Em toda combustão, dentro da câmara, a quantidade de gás quente sendo produzida depende da área da frente da chama. Quanto maior a área, maior o empuxo. Conforme o propelente queima, a forma e a área da frente da chama mudam e isso faz com que o empuxo mude.

A frente da chama é mostrada na Fig. 6 como uma linha amarela que se move através do propelente enquanto queima. No foguete, um pequeno cone é formado no propelente na extremidade do bico do motor. Conforme o propelente queima, o tamanho do cone aumenta até atingir a carcaça do motor (cerca de 0,2 s). O aumento da área de superfície do cone causa o grande aumento no empuxo entre o $t = 0$ e $t = 0,2$ s. Entre $t = 0,2$ e 0,5 s, a forma do cone achata-se e a área e o impulso diminuem. Por $t = 0,5$ s, o cone torna-se uma frente de chama plana que prossegue para baixo no motor até que o propelente se esgote em $t = 2,0$ s. Entre 0,5 e 2 s, o empuxo é constante, porque a área da frente da chama é constante. No instante $t = 2,0$ s, o propelente é completamente queimado e o empuxo vai a zero [16]. Imediatamente, a carga de atraso começa a queimar. Mesmo que a quantidade de carga de retardo

seja menor do que de propelente, ela queima por mais tempo porque é feita de um material diferente. Para esse motor, mostramos um atraso de 4 s. No $t = 6$ s, a carga de ejeção é atingida e acesa e explode pela frente do motor.

Um fenômeno similar ao mostrado na Fig. 6, em menor escala, ocorre dentro da câmara de combustão (garrafa PET) do nosso protótipo. A queima do combustível, como descrita na Eq. (2), precisa de O_2 para ocorrer. Em nosso experimento, cada medida foi realizada com uma quantidade aproximada de 1,3 g de álcool 70%, o que significa que a quantidade útil de álcool disponível para a reação era de aproximadamente 0,91 g. Para a combustão total dessa quantidade de álcool, seria necessário um volume de O_2 de, aproximadamente, 1,9 g.

Considerando o ar como um gás ideal, com massa molar

28,96 g/mol, e considerando o volume nas condições normais de temperatura e pressão (CNTP) de 22,4 L/mol, nossa garrafa PET de 1,5 L possuía uma quantidade de 0,067 mol de ar, equivalente a uma quantidade de 1,94 g de ar, em seu interior.

Em condições normais, a composição do ar apresenta um percentual médio de 20,95% de O_2 ; dessa forma, o interior da garrafa PET contava com aproximadamente 0,41 g de O_2 . Essa quantidade de O_2 representa apenas cerca de 45% do que seria necessário para realizar a queima total do álcool no interior da garrafa PET.

Esses valores sugerem que a com-

bustão do álcool pode ter sido parcial, ou que durante o processo de combustão foi utilizado oxigênio do exterior da garrafa. Essa segunda hipótese nos parece menos provável, uma vez que existia apenas um orifício, no fundo da garrafa, pelo qual os gases provenientes da combustão são ejetados. Entretanto, como pode ser visto na Fig. 4, um pico inicial da aceleração é seguido de uma desaceleração muito breve, até que a aceleração aumente novamente.

Esse comportamento pode indicar que existe uma primeira queima com o álcool em forma gasosa disponível dentro da garrafa, seguido de uma diminuição abrupta na pressão interna, causada pela súbita ejeção dos gases da combustão. Essa diminuição da pressão interna, por sua vez, pode fazer com que nesse breve instante exista um fluxo de ar para dentro da garrafa, o que permitiria a entrada de mais O_2 para a queima do restante do álcool. Entretanto, não podemos confirmar esse comportamento apenas com os dados coletados.

Ainda de acordo com a Eq. (2), é possível determinar a quantidade de massa de água esperada para a combustão completa. Essa previsão poderia nos ajudar a avaliar a combustão, entretanto não obtivemos medidas de massa de água confiáveis para afirmar sobre essa combustão, mesmo porque parte da água formada pode ter escapado junto com os gases provenientes da combustão.

Entretanto, vale ressaltar que é bem visível, ao fim de cada experimen-

to, uma quantidade significativa de água depositada no interior da garrafa. A observação desse fato é interessante para discutir o fato de que o álcool utilizado possui 30% de água (cerca de 0,4 g para cada medida). Entretanto, visivelmente a quantidade de água no interior da garrafa é superior a esse valor, o que confirma visualmente, para o aluno, a formação de parte do produto esperado pela Eq. (2), fato que em uma aula teórica é subjetivo e poderia ser apenas imaginado pelo aluno.

5. Considerações finais

O artigo revisitou uma demonstração experimental bem conhecida, aprimorada com o uso do Arduino, para análise mais detalhada da dinâmica do movimento e dos processos químicos envolvidos na origem do fenômeno.

Nossa análise indicou que o movimento da garrafa PET, presumidamente simples, mostrado com frequência para ilustrar a terceira Lei de Newton, possui uma quantidade de variáveis e fatores interessantes para serem analisados, e pode servir de motivação para abordagem da cinemática e da dinâmica do movimento.

Outro fator interessante sobre os resultados da análise diz respeito à interdisciplinaridade. A abordagem do fenômeno do ponto de vista investigativo pode ser um excelente instrumento para trazer à tona assuntos de outras disciplinas e incorporá-los à compreensão do fenômeno. Foi necessário, por exemplo, recorrer à química para entender um pouco melhor a combustão que originou o movimento.

Recebido em: 27 de Julho de 2021

Aceito em: 27 de Outubro de 2021

Referências

- [1] T.C.Leal dos S., A.A. de Oliveira, Revista Brasileira de Ensino de Física **41**, e20180354 (2019).
- [2] Brasil, Ministério da Educação e Cultura, *Orientações Educacionais Complementares aos Parâmetros Curriculares Nacionais do Ensino Médio* (Mec/Semtec, Brasília, 2002).
- [3] T.D. Admiral, Rev. Revista Brasileira de Ensino de Física **42**, e20200139 (2020).
- [4] I.N. de Oliveira, J.A.P. Ramos, W.L. Silva, V.D. Chaves, C.A.O. Melo, Revista Brasileira de Ensino de Física **42**, e20190105 (2020).
- [5] P.R. Anderson, e cols. Revista Brasileira de Ensino de Física **43**, e20200355 (2021).
- [6] S.D. Fatmaryanti, Y. Al Hakim Physics and Educ. IOP Conf. Ser. **403**, 012033 (2018).
- [7] G.S. Sales, In: *VI SEPIN – Seminário de Extensão, Pesquisa e Inovação*. IFRS (2015).
- [8] M.V.S. Fonseca, I.M.L. Rodrigues, M.B.S. Fonseca, Revista Brasileira de Ensino de Física **40**, e3504 (2018).
- [9] S.G. Negreiros, G.F.B. de Oliveria, in: *Encontro de Computação do Oeste Potiguar*, Rio Grande do Norte (2020).
- [10] S.G. Negreiros, G.F.B. de Oliveira, Física na Escola **15**(2), 63 (2017).
- [11] C.M. Sitko, J.B.G. Canalle, A.A. De Mesquita, A Física na Escola **19**(1), 38 (2021).
- [12] J.O. Chang, F.L.Q. Costa, I.C. Dutra, G.A.F. Nery, L.H. Nery e cols., Caderno Brasileiro de Ensino de Física **36**, 529 (2019).
- [13] B.P. Vendruscolo, A.J. Staats, P.A. Schmidt, D.F. Soares, P.G. Pascoal, N.A. Toniazco, in: *Congresso XVII Jornada de Extensão*, Unijuí (2016).
- [14] J. Martins, *Motores de Combustão Interna* (Publindústria, Porto, 2013), 4ª ed., 437 p.
- [15] S. Turns, *An Introduction to Combustion: Concepts and Applications* (McGraw-Hill, Pennsylvania, 2000), 2nd ed.
- [16] <https://www.grc.nasa.gov/www/k-12/rocket/rktengperf.html>.

Material Suplementar

```
//Adaptado do exemplo da biblioteca do Arduino "Basic Readings"
//Inclusão das bibliotecas
#include <Adafruit_MPU6050.h>
#include <Adafruit_Sensor.h>
#include <Wire.h>
Adafruit_MPU6050 mpu;
void setup(void) { //Configurações
  Serial.begin(9600);
  //Esse valor vem 115200 no exemplo, mas não funciona nesse Arduino mini
  while (!Serial)
    delay(10);
  //Tempo de checagem da serial
  Serial.println("Adafruit MPU6050 teste!");
  if (!mpu.begin()) {
  //Tentativa de inicialização
    Serial.println("Erro ao encontrar MPU6050");
  //Mensagem que você verá caso o sensor não responda
    while (1) {
      delay(10);
    }
  }
  Serial.println("MPU6050 Encontrado!");          mpu.setAccelerometerRange(MPU6050_RANGE_8_G);
  //Mudança de escala do acelerômetro (ele vem por default em 2g)
  Serial.print("Escala do acelerômetro selecionada: ");
  //Exibindo a escala selecionada para conferência
  switch (mpu.getAccelerometerRange()) {
  case MPU6050_RANGE_8_G:
    Serial.println("+8G");
    break;
  case MPU6050_RANGE_16_G:
    Serial.println("+16G");
    break;
  }
  mpu.setFilterBandwidth(MPU6050_BAND_21_HZ);
  //Seleção de filtro de largura de banda (manter em 21Mhz)
  Serial.print("Largura do filtro selecionada: ");
  //Exibe filtro selecionado
  switch (mpu.getFilterBandwidth()) {
  case MPU6050_BAND_21_HZ:
    Serial.println("21 Hz");
    break;
  case MPU6050_BAND_10_HZ:
    Serial.println("10 Hz");
    break;
  }
  delay(100);
}
void loop() {
  sensors_event_t a, g, temp;
  //Cria as variáveis pela biblioteca
  mpu.getEvent(&a, &g, &temp);
  //Associa cada variável à sua natureza
  Serial.println(a.acceleration.x);
  //Mostra os valores de aceleração (em m/s²) na serial
  delay(10);
  //Aguarda 10ms e faz a nova medida
}
```

Código para leitura dos dados de aceleração.