

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS  
INSTITUTO DE FÍSICA “GLEB WATAGHIN”

F609A – Tópicos de Ensino de Física I

# Relatório Final: Foguete de Água

ALUNO: Lucas Ferrari de Carvalho Costa  
e-mail: lucas.prk@gmail.com  
ORIENTADOR: Prof. Dr. Carlos Alberto Luengo  
e-mail: luengo@ifi.unicamp.br  
COORDENADOR: Prof. Dr. José Joaquin Lunazzi



## 1- Resultados Atingidos

A coleta dos materiais foi feita rapidamente, já que contava com materiais simples e que fazem parte do nosso cotidiano, como a garrafa PET, a rolha e mangueiras usadas para fazer o foguete e o sistema de propulsão, já a plataforma, foram encontradas uma estrutura metálica e acrílica, que forneceram uma plataforma mais estável para o lançamento, e para podermos estabilizar o foguete na plataforma usamos a princípio um cone feito com um tubo de PCV colado na superfície da plataforma, porém este não deu a sustentação necessário sendo trocado por um cone de plástico que foi parafusado no acrílico, conforme pode ser visto na Figura 2.

Com toda a estrutura pronta, foi feito o teste de estabilidade do foguete a partir do teste sugerido pelo anexo 2.

Assim com o resultado positivo obtido neste teste, passamos para a parte da adequação da estética do foguete e plataforma, onde no foguete o mesmo foi coberto com fita tipo “silvertape”, Figura 3, e a plataforma foram usados um plástico adesivo sobre o acrílico e este fixado na estrutura metálica por parafusos, e por ultimo fixado o cone que da a estabilidade para o foguete ficar na vertical para a hora do lançamento, Figura 4.

Para podermos fazer o sistema que iria injetar ar na câmara de propulsão, foram usadas mangueiras acopladas umas as outras com o uso de abraçadeiras Figura 5 e na ponta foi colocada uma válvula de pneu, fixada também por abraçadeiras, onde seria colocada a bomba de ar que injetaria ar no sistema.

Dessa forma com tudo pronto foi feito o teste para o lançamento do foguete, que ocorreu com sucesso e pode ser visto no vídeo que estará no CD, e abaixo na Figura 1, podemos ver o momento do lançamento e com a ajuda de um programa no qual foram pegas as imagens no intervalo de tempo de 40ms.



Figura 1: Momento do Lançamento entre 16,32 a 16,76 segundos com intervalo de tempo de 40 ms entre as fotos

A partir da análise destas imagens podemos chegar que a velocidade média do foguete no intervalo de tempo entre o momento em que ele sai da plataforma no instante 16,44s até o momento em que ele esta com o bico quase que na minha altura 1,80m em 16,48s, ou seja, um  $\Delta t = 0,04s$  a parte de baixo do foguete percorreu uma distancia de

aproximadamente 1m, assim temos que sua velocidade média neste intervalo foi de 25m/s, e após este instante vemos que o foguete fica sem água, logo sua velocidade não aumenta mais e ele passa a ficar submetido apenas à força da gravidade e ao atrito com o ar até cair.

Existem também melhorias que podem ser feitas para aumentar a pressão no momento do lançamento, no qual existe uma base de PVC diferente da sugerida pelo anexo 1, no qual usa-se uma trava no foguete, onde é possível segura-lo e colocar a pressão que se desejar nele, e no instante em que se acha que chegou a pressão ideal para o lançamento retiramos a trava e o foguete então é lançado. Esta inovação foi possível ver graças às demonstrações feitas durante as apresentações dos trabalhos, onde um dos alunos havia feito esta trava.

Foi feito um lançamento do meu foguete com esta base e ele voou ainda mais alto e na descida por conta da aerodinâmica diferente do foguete deste outro aluno, o que foi feito neste experimento planou e suavizou sua queda, aumentando assim seu tempo de vôo, efeito este interessante para que os alunos vejam o foguete no ar e podemos falar que é desta maneira que ocorre a volta de um foguete para a Terra quando este esta em órbita. Além de poder detalhar melhor este processo explanando os processos de desaceleração que o foguete passa, do porque da proteção contra o aumento de temperatura pela qual a nave passa por conta do atrito com o ar, tornando uma aula sobre foguete bem interessante, na qual você terá a atenção do aluno, por conta do experimento e poderá aplicar vários conceitos importantes de física.

## 2- Fotos da Experiência

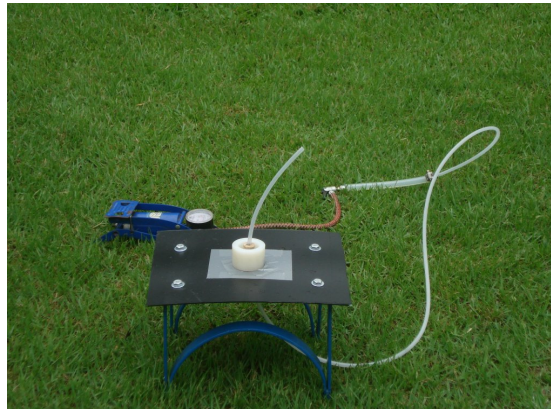


Figura 2: Plataforma de Lançamento



Figura 3: Foguete



Figura 4: Foguete pronto para o Lançamento

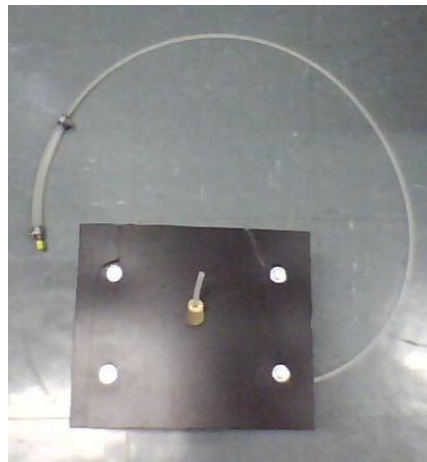


Figura 5: Mangueira com abraçadeiras



Figura 6: Preparando o Foguete para o Lançamento



Figura 7: Plataforma de Lançamento, vista superior

### 3- Dificuldades Encontradas

A única dificuldade encontrada foi conseguir estabilizar o foguete na vertical na plataforma de lançamento, no início não haveria nada, conforme pode ser visto na Figura 5, porém não funcionou, assim foi feito o teste usando um cone de tubo de PVC fixado com cola quente na plataforma de lançamento, mas após alguns testes, ela começou a perder a estabilidade e quebrou, assim foi feita uma estrutura mais forte, de plástico e fixada com parafusos na plataforma, que forneceram a estabilidade suficiente para manter o foguete na vertical para o lançamento.

### 4- Referencias

[1] website: <http://www.cdcc.usp.br/cda/sessao-astronomia/seculoxx/textos/foguetes-e-satelites.htm>

ultimo acesso 08/09/09

[2] website: [http://pt.wikipedia.org/wiki/Foguete\\_espacial](http://pt.wikipedia.org/wiki/Foguete_espacial)

ultimo acesso 08/09/09

[3] website: <http://www.adorofisica.com.br/trabalhos/fis/equipes/corridaespacial/foguetes.htm>

ultimo acesso 08/09/09

[4] website: <http://www.pontociencia.org.br/experimentos-interna.php?experimento=157&FOGUETE+DE+AGUA#top>

ultimo acesso 08/09/09

[5] website: <http://www.fisica.ufs.br/CorpoDocente/egsantana/fluidos/dinamica/cohete/cohete.htm>

ultimo acesso 08/09/09

[6] website: [http://br.geocities.com/aafaa\\_br/](http://br.geocities.com/aafaa_br/)

ultimo acesso 08/09/09

[7] website: <http://www.sbfisica.org.br/fne/Vol8/Num2/v08n02a02.pdf>

ultimo acesso 08/09/09

[8] Vídeos disponíveis no site <http://www.youtube.com> ultimo acesso 08/09/09

- <http://www.youtube.com/watch?v=3SAsjM1PriM>

- <http://www.youtube.com/watch?v=9fm04OI6FDA&feature=fvw>

[9] Vídeo disponível no site [http://www.ifi.unicamp.br/~lunazzi/F530\\_F590\\_F690\\_F809\\_F895/F809videos\\_outros.htm](http://www.ifi.unicamp.br/~lunazzi/F530_F590_F690_F809_F895/F809videos_outros.htm) ultimo acesso 08/09/09

-Foguete de água

[10] D. Halliday, R. Resnick e J. Walker, Fundamentos de Física – Mecânica (Livros Técnicos e Científicos Editora S.A., Rio de Janeiro), v.1, 6ªed.

[11] D. Halliday, R. Resnick e J. Walker, Fundamentos de Física – Gravitação, Ondas e Termodinâmica (Livros Técnicos e Científicos Editora S.A., Rio de Janeiro), v.2, 6ªed.

[12] H. Moysés Nussenzveig, Curso de Física Básica – Fluidos, Oscilações, Ondas e Calor (Editora Edgar Blücher LTDA, 2002) v2., 4ªed

[13] website: [http://www.clubequark.org.br/experiencias/foguetes\\_de\\_agua.htm](http://www.clubequark.org.br/experiencias/foguetes_de_agua.htm) ultimo acesso 08/09/09

[14] <http://www.projetofoquete.cjb.net/> - pode-se ver uma análise teórica dos fenômenos envolvidos e ainda descreve o processo de estabilização do foguete.

[15] <http://www.gluon.com.br/blog/2008/04/15/foguete-agua-discovery/> - comenta o fato de um foguete de água ter subido a cerca de 650 m, mostrando a que altura pode chegar um foguete destes e também coloca a curiosidade se é possível ou não fazer um foguete destes para o homem.

[16] <http://www.gustavoroberto.blog.br/2008/09/23/experiencias-com-um-foguete-movido-a-agua/> - mostra qual a pressão que uma garrafa PET pode agüentar e mostra um calculo de como obter a altura que o foguete pode atingir.

## 5- Descrição do Trabalho

### 5.1 Introdução Histórica

A história da Astronáutica começa com o desenvolvimento dos primeiros foguetes e satélites. Não fossem os testes do americano Robert Goddard com o primeiro foguete de combustível líquido da história, que subiu apenas 12 metros em 16 de março de 1926, o homem nunca teria chegado a Lua, os meteorologistas dificilmente teriam emprego, e provavelmente muitas pessoas ainda acreditariam que os marcianos poderiam invadir a Terra a qualquer momento.

Os foguetes são as peças fundamentais no desenvolvimento da astronomia, pois lançaram e ainda hoje lançam instrumentos muito poderosos ao espaço, como sondas interplanetárias, que nos revelam os segredos dos planetas mais distantes, telescópios espaciais, que nos revelam os segredos das estrelas e galáxias mais distantes, e satélites voltados para a própria Terra, lembrando-nos que ainda existem muitos segredos a serem revelados aqui mesmo. Como já foi citado, os satélites também são de extrema importância na astronomia, pois orbitando a Terra eles capturam dados científicos impossíveis de serem obtidos do solo.

O desenvolvimento de todos esses equipamentos começou no início do século XX, que talvez fique marcado como "o século em que o homem saiu da Terra". [1]

A origem do foguete provavelmente é oriental, mais especificamente na China, local onde foi inventada a pólvora que serviu de combustível para os primeiros foguetes. A primeira notícia que se tem de seu uso data do século XIII, porém para fins militares, servindo como armas, este seu uso ocorreu até a 2ªGuerra Mundial onde foram usados para atacar as cidades de Londres e Paris. [2,3]

Após a guerra cientistas alemães liderados por Wernher von Braun, foram presos e obrigados a irem trabalhar nos Estados Unidos ou ficavam na Alemanha e seriam mortos pelos nazistas para que sua tecnologia fosse revelada aos seus inimigos. Daí que

realmente começou a haver o desenvolvimento do uso de foguetes para a exploração espacial, aliado aos estudos já feitos por outros cientistas americanos.[1]

Para explicar o funcionamento de um foguete, o melhor exemplo é uma bexiga de ar, destas que enfeitam festinhas de crianças. Uma vez cheia, quando o ar é liberado, a bexiga projeta-se no sentido contrário ao da saída do ar. Mas não é este “jato” que impulsiona o objeto de borracha e sim uma força idêntica e no sentido contrário à saída, na parede oposta à boca. [3]

## 5.2 Descrição Teórica

Podemos explicar este experimento de 3 maneiras, uma de maneira mais básica, para o publica geral, outra forma seria explicar de para o Ensino Médio, usando conceitos estudados por eles na escola e podemos dar uma explicação para o Ensino Superior que é semelhante ao do Ensino Médio, mas com alguns conceitos a mais.

Dessa forma vamos começar dando uma explicação mais básica, que consiste de um processo semelhante ao de se abrir uma garrafa de champanhe, onde ao agitar a garrafa dessa bebida é liberado gás que aumenta a pressão dentro da garrafa até o ponto em que a rolha escapa e sai, abrindo a garrafa.[14]

Para o ensino médio, primeiramente devemos compreender como se da estabilidade do vôo para isso devemos encontrar o Centro de Massa (CM) que é encontrado ou tentando equilibrar a garrafa sobre uma régua ou a partir da equação 1 [7]:

$$y_{CM} = \frac{\sum_i y_i m_i}{\sum_i m_i}, \quad (1)$$

E também devemos encontrar o Centro de Pressão (CP), responsável pela influencia da força aerodinâmicas do sistema, que é a média da somas das áreas do corpo, que é dado pela equação 2 [7]:

$$y_{CP} = \frac{\sum_i y_i A_i}{\sum_i A_i}, \quad (2)$$

Assim para termos uma boa estabilidade o CM deve ficar até 1,5 cm acima do CP, para que possa haver correção por parte do CP se a garrafa sair do eixo, se o CP estiver acima é ruim pois se a garrafa sair do eixo o CP irá aumentar o desvio dele e não subirá bem, podemos analisar isto através da Figura 8 [7].

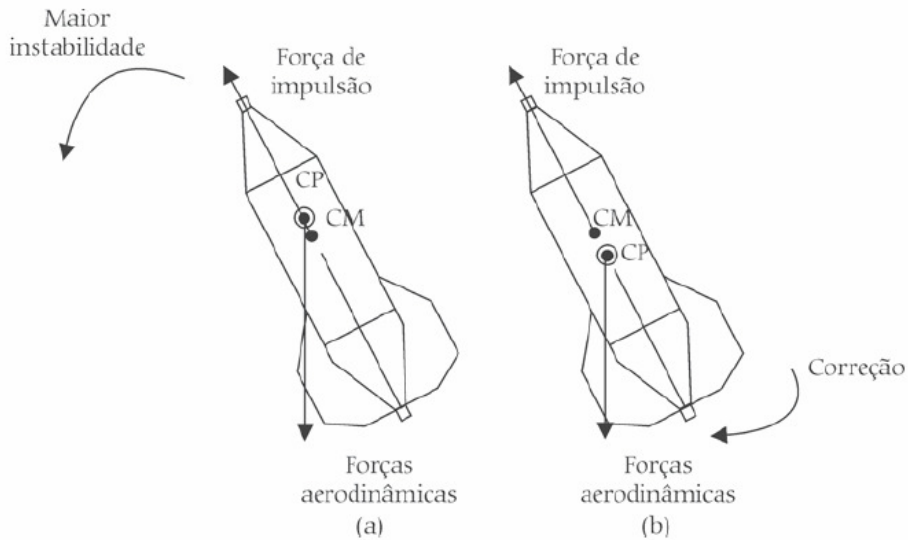


Figura 8. (a) Posição incorreta do CM em relação ao CP causando maior instabilidade no foguete durante o voo. (b) Posição correta entre CM e CP, causando a correção durante o voo.

Assim temos a estabilidade do corpo durante seu voo, depois devemos compreender como que ocorre a propulsão do foguete que é dada pelo Empuxo e pelas leis de Newton [7].

Pela 1ª Lei de Newton temos A Lei da Inércia diz que "Qualquer corpo em movimento continuará se movendo e qualquer corpo parado permanecerá parado até que alguma força externa aja sobre ele". Em outras palavras, inércia é a tendência que os objetos têm de resistir a mudanças no movimento. Ela tem a ver com a massa do objeto, que no cotidiano costumamos de chamar de peso [14].



Figura 9: Uma garrafa mais cheia tem mais inércia, pois possui mais massa. Mais inércia quer dizer mais resistência a mudanças de direção. O vento precisa trabalhar mais para alterar o curso da garrafa.



Figura 10: Uma garrafa menos cheia tem menos inércia, pois possui menos massa. Menos inércia quer dizer menos resistência a mudanças de direção. Com pouca força o vento empurra a garrafa para outro curso.

Pela Segunda Lei de Newton diz que a Força aplicada é igual à massa vezes a aceleração, ou:  $F=m \cdot a$  (3). Se dois foguetes aplicam forças iguais [14].



Figura 11: Uma garrafa de maior massa (mais cheia) terá uma menor aceleração.

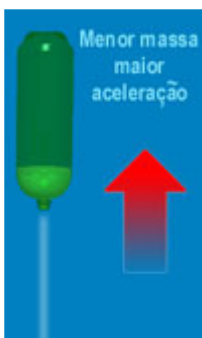


Figura 12: Uma garrafa de menor massa (menos cheia) terá uma maior aceleração.



E pela Terceira Lei de Newton diz que "para cada ação, há uma reação de igual intensidade e de sentido oposto". Isso quer dizer que quanto mais água for expelida e quanto mais depressa isso acontecer, maior será a reação da garrafa, assim pela conservação da quantidade de movimento essa reação proporcionará o foguete para cima [14].

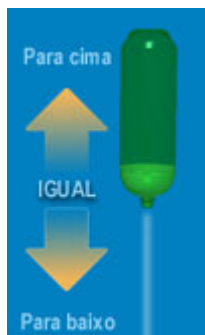


Figura 13:

Massa da garrafa e da água x Velocidade da garrafa

É IGUAL A

Massa da água expelida x Velocidade da água expelida

O empuxo é como chamamos a força que faz subir o foguete. Nos foguetes a água, o ar pressurizado empurra a água para fora, causando uma reação da garrafa em sentido oposto (3ª Lei de Newton) [14].

Portanto o empuxo depende tanto da velocidade com que a água é expelida quanto do "tamanho" do bocal de saída. Assim, o empuxo pode ser calculado como sendo aproximadamente igual ao dobro do produto da pressão pela área da seção do bocal. Ou seja,  $E = 2 \cdot P \cdot A$  (4) [14].

Assim de maneira simplificada o aluno pode ver vários conceitos vistos em sala de aula em prática neste experimento [14].

Já para o Ensino Superior podemos dar uma explicação mais detalhada e usando equações mais elaboradas como será descrito a partir de agora.

Para o cálculo do CM e CP serão usadas as mesmas equações usadas no Ensino Médio, e para descrever o movimento do foguete durante a ejeção de água vamos usar uma aplicação da segunda Lei de Newton [7]:

$$\sum F = \frac{\Delta p}{\Delta t} \quad (5)$$

Para sua descrição, consideremos que a única força atuante sobre o foguete é a força gravitacional (desprezemos o atrito do ar). Imaginemos que o foguete está em movimento inicial uniforme, com velocidade constante  $v$ . Na realidade a velocidade é zero, pois o foguete está parado sobre a base de lançamentos, mas utilizaremos este artifício para manipulações matemáticas mais simples. O momento linear inicial do foguete será então  $p_i = Mv$ , onde  $M$  é sua massa inicial que é dada por  $M = m_F + m_{H_2O}$ , ou seja, a massa do foguete vazio ( $m_F$ ) mais a massa de água contida em seu interior ( $m_{H_2O}$ ), como mostra a Figura 14a. No momento em que ocorre a ejeção de uma pequena quantidade de água  $\Delta m_{H_2O}$  a uma velocidade  $v_f$ , a velocidade do foguete é alterada de  $\Delta v$  (Figura 14b). Logo, o sistema terá um momento final dado por [7]:

$$p_f = (M - \Delta m_{H_2O}) \cdot (v + \Delta v) - \Delta m_{H_2O} v_f \quad (6)$$

Se  $\Sigma F = -Mg$ , substituindo a Eq. (6) na Eq. (5) [7]:

$$-Mg = \frac{(M - \Delta m_{H_2O})(v + \Delta v) - \Delta m_{H_2O}v_f - Mv}{\Delta t} \quad (7)$$

Manipulando esta equação e desprezando o termo  $\Delta m_{H_2O}\Delta v$  já que  $\Delta m_{H_2O}$  é muito pequeno, obtemos para a velocidade do foguete  $\Delta v$  [7]:

$$\Delta v = -g\Delta t + \frac{\Delta m_{H_2O}}{M}u, \quad (8)$$

onde  $u$  é a velocidade de escape da água relativa ao foguete,  $u = v + v_f$ . Utilizando as quantidades  $\Delta m_{H_2O} = \rho\Delta V$  e  $M = \rho V_{H_2O} + m_F$ , onde  $\rho$  é a densidade da água,  $\Delta V$  a mudança no volume de ar dentro do foguete,  $V_{H_2O}$  o volume de água dentro do foguete e  $m_F$  a massa do foguete vazio, temos [7]:

$$\Delta v = -g\Delta t + \left( \frac{\rho\Delta V}{\rho V_{H_2O} + m_F} \right)u. \quad (9)$$

Podemos obter a velocidade do foguete durante o tempo  $\Delta t$  de ejeção da água conhecendo-se a velocidade de escape da água  $u$  em relação ao foguete [7].

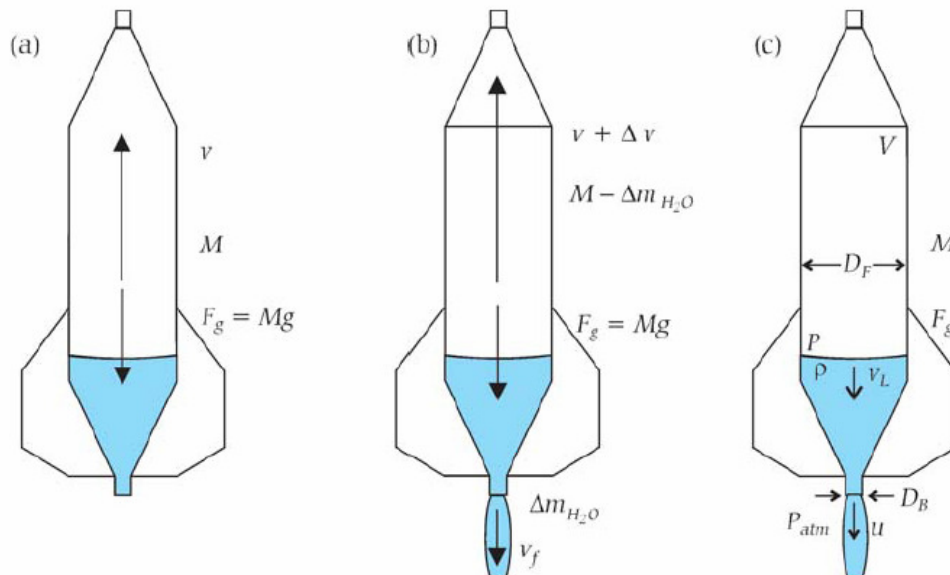


Figura 14. (a) Configuração do foguete no momento em que não é ejetada nenhuma quantidade de água; sua massa é  $M$  e sua velocidade é  $v$ . A única força atuante é a força gravitacional,  $F_g$ . (b) Configuração do foguete após a ejeção de uma pequena quantidade de água com massa  $\Delta m_{H_2O}$  e velocidade  $v_f$ . A massa do foguete muda para  $M - \Delta m_{H_2O}$  e sua velocidade para  $v + \Delta v$ . (c) Mostra-se o volume  $V$  de ar dentro do foguete;  $P$ , a pressão sobre a superfície da água;  $D_F$ , o diâmetro do foguete;  $D_B$ , o diâmetro do bocal;  $\rho$ , a densidade da água;  $v_L$ , a velocidade da água dentro do foguete;  $u$ , a velocidade de escape da água em relação ao foguete e  $P_{atm}$ , a pressão atmosférica.

Para obtermos  $u$ , vamos considerar a água como um fluido perfeito e incompressível e seu escoamento pelo tubo (foguetete) estacionário. Utilizando a equação de Bernoulli, temos [7]:

$$\frac{1}{2}\rho v_L^2 + P = \frac{1}{2}\rho u^2 + P_{atm} \quad (10)$$

onde as quantidades apontadas no primeiro membro da Eq. (10) estão relacionadas à quantidade de água no interior do foguete, ou seja, sua densidade  $\rho$  e sua velocidade  $v_L$ , a pressão  $P$  em sua superfície. No segundo membro estão as quantidades relacionadas à porção de água que é ejetada do foguete, que são sua velocidade relativa  $u$ , a qual queremos encontrar, e a pressão atmosférica  $P_{atm}$  no bocal da garrafa. Note que estamos desprezando a parte da energia potencial gravitacional da equação de Bernoulli, pois sua magnitude é desprezível comparada com as outras grandezas envolvidas [7].

Ambas as velocidades  $u$  e  $v_L$  estão relacionadas com a taxa com que a água é ejetada, ou, equivalentemente, à taxa com que o volume de ar  $V$  dentro da câmara aumenta. Esta relação é dada pela equação de continuidade [7]:

$$\frac{\Delta V}{\Delta t} = \frac{1}{4}u\pi D_B^2 = \frac{1}{4}v_L\pi D_F^2 \quad (11)$$

sendo  $D_B$  e  $D_F$  os diâmetros do bocal e do corpo da garrafa, respectivamente. A Fig. 14c ilustra as grandezas apresentadas nas Eqs. (10) e (11) [7].

Da Eq. (11) observa-se que  $v_L$  é proporcional à razão  $D_B/D_F$ , que por sua vez é muito menor que 1, tornando-se menor ainda quando elevada à quarta potência na Eq. (10). Logo, podemos desprezar o primeiro termo da Eq. (10), o que nos permite obter a expressão para a velocidade de escape da água, que é dada por [7]:

$$u = \sqrt{\frac{2(P - P_{atm})}{\rho}} \quad (12)$$

Quando a garrafa retorna ao solo observa-se que há vapor de água dentro da mesma, e isso implica que houve resfriamento do ar dentro da garrafa no momento de sua expansão. Como  $\Delta t$  é muito pequeno, significa que este processo de expansão pode ter ocorrido sem trocas de calor entre o sistema, câmara de compressão e a vizinhança. Portanto podemos supor que houve uma expansão adiabática. Admitindo que o ar seja um gás ideal, temos [7]:

$$P = P_0 \left( \frac{V_0}{V} \right)^\gamma \quad (13)$$

onde  $P_0$  é a pressão absoluta inicial dentro do foguete,  $V_0$  o volume inicial de ar dentro do mesmo e  $V$  seu volume final, que é o volume da garrafa. Como o ar pode ser considerado um gás diatômico, temos que  $\gamma = 1,4$ . Substituindo a Eq. (13) na Eq. (12), obtemos finalmente, para a velocidade de escape da água [7]:

$$u = u_c \sqrt{\left(\frac{V_0}{V}\right)^\gamma - \frac{P_{atm}}{P_0}}, \quad (14)$$

onde  $u_c$  é a velocidade característica dada por [7]:

$$u_c = \sqrt{\frac{2P_0}{\rho}}. \quad (15)$$

Calculando  $u$  pela Eq. (14) e substituindo na Eq. (8), pode-se obter a velocidade do foguete no momento em que ocorre toda ejeção de água (Eq. (16)) e estimar sua aceleração durante o processo que, dependendo da pressão imposta, pode ser da ordem de dezenas de vezes a aceleração da gravidade; um resultado realmente incrível utilizando apenas garrafas PET, água e ar comprimido [7].

$$\Delta v = -g\Delta t + u_c \left[ \left( \frac{\rho\Delta V}{\rho V_{H_2O} + m_F} \right) \cdot \sqrt{\left(\frac{V_0}{V}\right)^\gamma - \frac{P_{atm}}{P_0}} \right] \quad (16)$$

Desta forma encerramos a descrição do movimento do foguete, lembrando que após ele atingir sua velocidade máxima ele começara a desacelerar e depois a cair em queda livre seguindo a equação da velocidade [7]:

$$V = V_0 - gt \quad (17)$$

Sendo que o  $V_0$  será dado pela Eq (16), até quando  $V=0$  que é onde ele começara a cair e acelerar com a gravidade até atingir o solo. Onde podemos calcular a altura aproximada obtida medindo o tempo de queda e aplicando na equação [7]:

$$H = \frac{gt^2}{2} \quad (18),$$

onde  $H$  é a altura, o tempo  $t$  será medido e  $g$  é a gravidade [7].

## 6- Declaração do Orientador

O meu orientador realizou os seguintes comentários:

- “1. O relatório final foi aprovado;
2. A montagem do foguete se deu de maneira satisfatória, com a plataforma modificada deixando-la mais firme o que é importante na hora do lançamento;
3. As melhorias na estética do foguete foram feitas e seu lançamento se realizou com sucesso, mostrando que mesmo usando materiais simples é possível obter um resultado bem interessante e que com certeza irá chamar a atenção dos

alunos tanto nos níveis escolares fundamental, médio e superior, apresentando conforme o relatório a explicação mais adequada para cada um dos níveis citados.”

## **Apêndices**

Foi incluída como apêndice a reportagem da revista na qual se originou a idéia para o desenvolvimento deste projeto e que conta com os maiores detalhes para a elaboração do experimento e suas explicações físicas para os fenômenos envolvidos.

E serão incluídos as referencias 14, 1 e 3, nesta ordem.



## Um foguete de garrafas PET

James Alves de Souza

Departamento de Física, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, SP, Brasil

E-mail: jamesfisica@gmail.com

Neste trabalho descreve-se a construção de um foguete utilizando garrafas descartáveis de refrigerante (PET) de 2 l e a montagem de um sistema de propulsão que funciona com água e ar comprimido. Mostra-se também vários fatores que influenciam na estabilidade do foguete durante o voo, como a obtenção e relação entre centro de massa e centro de pressão. Apresenta-se ainda a teoria envolvida durante o lançamento por meio de algumas aproximações, mostrando a aplicabilidade de assuntos comuns no ensino médio como segunda e terceira leis de Newton, conceitos de momento linear e velocidade relativa, movimento de um fluido perfeito utilizando a equação de Bernoulli e a equação de continuidade e expansão adiabática de um gás ideal. Por fim, obtém-se a velocidade máxima que o foguete pode atingir aplicando-se uma pressão de 80 psi, sendo possível estimar a aceleração do mesmo durante o processo de ejeção de água, algo próximo a 25 g, um resultado surpreendente pela simplicidade da montagem.

Mostramos também que a medida de pressão é o psi - *pound-force per square inch*, significa libra por polegada quadrada -, porque esta é a unidade dos manômetros das bombas de encher pneus. A unidade pascal (Pa) é a utilizada no sistema internacional de unidades (SI).

### Material utilizado

Os materiais citados abaixo não são os únicos que podem ser utilizados para a construção do foguete; a imaginação do construtor pode dar lugar a substituições. São necessários:

- 2 garrafas descartáveis de refrigerante (PET) de dois litros. Utilize somente PET, pois este material pode suportar altíssimas pressões internas
- placa pluma ou isopor de alta densidade (facilmente encontrada em supermercados na forma de bande-

jas para embalagem de alimentos)

- fita adesiva transparente
- 1 rolha de cortiça grande
- 1 válvula de pneu de bicicleta
- 1 tubo de caneta vazio
- 1 mangueira com até 6 mm de diâmetro
- 1 bomba de encher pneu de bicicleta

### Procedimento

#### Foguete

As duas garrafas PET são os principais componentes do foguete, pois serão utilizadas para a construção da sua fuselagem, que é composta pela câmara de combustão (que chamaremos de câmara de compressão) e pelo nariz, região frontal do foguete.

Para a câmara de compressão utilizaremos uma garrafa inteira sem alterações. Esta é a parte do foguete em que estará contido o seu combustível (a água). Para o nariz, utilizaremos apenas a parte de cima da garrafa, cônica, como mostra a Fig. 1a. Essa peça tem a função de minimizar o atrito do ar durante o voo do foguete, fornecendo ao mesmo um formato mais aerodinâmico. Em seguida, fixe a parte cônica no fundo da outra garrafa inteira com a fita adesiva, conforme mostra a Fig. 1b. É importante que se tenha um bom alinhamento entre estas partes (Fig. 1c), para que não haja maiores complicações durante o voo.

O próximo passo é a construção das aletas do foguete; elas são fundamentais para sua estabilidade durante o voo. Pegue as bandejas de isopor de alta densidade e recorte-as no formato de trapézios, de modo que eles se encaixem na parte cônica da garrafa inteira (Fig. 2). O formato das aletas é arbitrário, mas sugerimos trapézios por conter somente retas e ser mais fácil de manipular durante o corte.

Utilizando a fita adesiva, fixe as quatro aletas na parte cônica da garrafa inte-

Propõe-se a construção de um pequeno foguete movido pela pressão d'água, de baixo custo, para ilustrar de forma lúdica o uso das leis de Newton e da equação de Bernoulli.

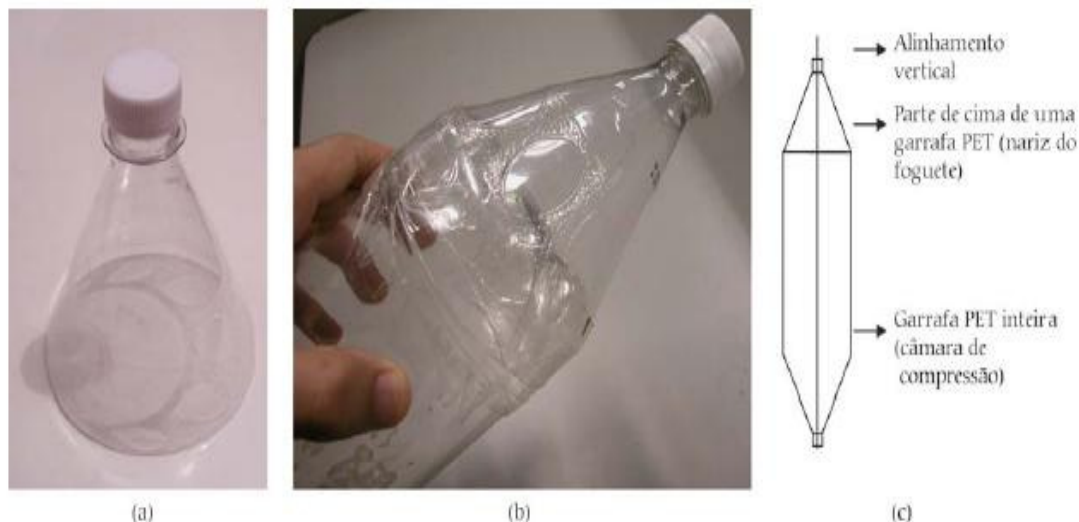


Figura 1. (a) Nariz do foguete obtido cortando-se a parte de cima de uma garrafa PET; (b) nariz fixado ao fundo da outra garrafa e (c) máximo alinhamento possível entre as partes.

ra, na região inferior do foguete, de modo que fiquem bem alinhadas duas a duas como se fossem imagens especulares (Fig. 3a).

Se os passos descritos até o momento forem bem sucedidos, o foguete estará pronto, como mostra a Fig. 3b. Nada impede a utilização de garrafas PET de outros formatos, mas optamos por garrafas de paredes retas por um motivo que descreveremos na seção sobre a estabilidade do foguete.

### Sistema de propulsão

O sistema de propulsão consta da base de lançamento e o aparato de pressurização que será conectado à câmara de compressão do foguete.

Pegue a rolha de cortiça e faça um furo com diâmetro um pouco menor que o diâmetro externo da mangueira, para que a mesma passe pelo furo e fique bem justa (Fig. 4a). Deixe a mangueira com uma ponta sobrando e encaixe o tubo de caneta nesta ponta (Fig. 4b). Apesar de não ser essencial, esse tubo tem a função de evitar alguns incômodos, como não deixar entrar água na bomba ou evitar

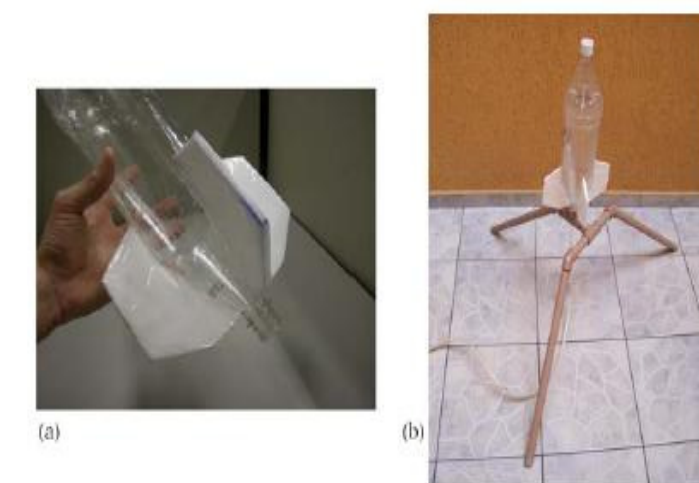


Figura 3. (a) As aletas devem ser fixadas simetricamente duas a duas. (b) Foguete pronto sobre a base de lançamento.

que a mangueira escape da rolha, pois seu encaixe provoca um estrangulamento na ponta da mangueira. Esse conjunto será encaixado no bocal da garrafa e é importante que fique firme, pois será a parte do sistema de propulsão que suportará o aumento da pressão interna do foguete. Se não for possível conseguir

uma rolha grande que satisfaça essa condição, pode-se optar por uma rolha menor e revesti-la com uma capa de pé de cadeira, como fizemos neste trabalho (Fig. 4a).

Agora encaixe a válvula de pneu de bicicleta na outra extremidade da mangueira, de maneira que a mesma fique bem encaixada na bomba de encher pneus. Se a bomba não contiver o encaixe mostrado na Fig. 4c, será preciso retirar o pino da válvula de pneu, pois este impossibilitará o bombeamento de ar para câmara. Nesse caso o tubo de caneta é indispensável.

A construção da base de lançamentos fica por conta da criatividade do leitor, mas pode-se optar por fazer uma base simples com outra garrafa PET, como mostra a Fig. 5a. Pegue a parte inferior de uma garrafa e faça cortes em suas laterais na direção das aletas do foguete, para que o mes-

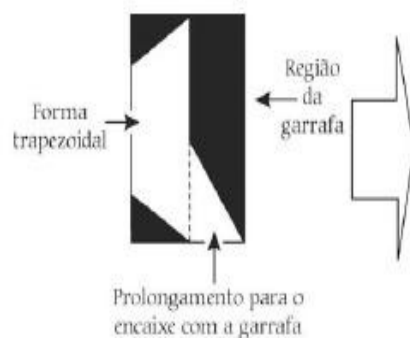


Figura 2. Formato das aletas do foguete.







Figura 4. Sistema de propulsão do foguete. (a) Encaixe da mangueira na rolha. (b) Encaixe do tubo de caneta na ponta saliente da mangueira; esse sistema será colocado no bocal da garrafa inteira. (c) Encaixe da válvula de pneu de bicicleta na outra extremidade da mangueira, para uma boa fixação da bomba.

mo fique apoiado na vertical. Em seguida faça um furo na lateral inferior da garrafa para inserção da mangueira conectada à rolha e a base estará concluída. Outra opção é fazer uma base mais sofisticada com tubos e conexões de PVC na forma de tripé (Fig. 5b). Foram utilizados três cotovelos de 45° e duas junções em T, sendo que a da parte central, onde o foguete se apóia, foi perfurada para a passagem da mangueira com a rolha. Os canos são de 3/4"; essa medida proporciona o encaixe perfeito do bocal da garrafa na junção em T. É interessante não colar as

junções assinaladas na figura para que se tenha liberdade de ajuste da base em locais irregulares, fazendo com que o foguete fique na vertical e também permitindo diferentes inclinações para lançamentos oblíquos. Na verdade, todas as partes dessa base podem ser somente encaixadas, mas para garantir firmeza é bom colar as outras conexões. Utilize cola adesiva própria para PVC. A Fig. 5b é um aumento da Fig. 3b.

#### Estabilidade do foguete

Dois cuidados muito importantes para a estabilidade do foguete durante o



Figura 5. Opções para a construção da base de lançamentos. Em (a), base construída com uma garrafa PET. Em (b), base construída com tubos e conexões de PVC.

vôo já foram tomados: utilizar uma garrafa cilíndrica, pelo fato de possuir simetria radial, e colar as aletas de maneira simétrica. Estes fatores nos proporcionam uma distribuição de massa razoavelmente homogênea em relação ao plano que passa pelo centro do foguete na vertical.

Diferentemente dos aviões que possuem asas e superfícies móveis de controle produzindo sustentação e permitindo a realização de vôos na horizontal, os foguetes são veículos projetados para se deslocar na direção vertical, ou o mais próximo possível desta, vencendo a força da gravidade. Então devemos nos atentar a dois pontos de equilíbrio de forças que são o centro de massa (CM) e o centro de pressão (CP), para que o foguete siga uma trajetória retilínea e reproduza de maneira satisfatória o vôo de um foguete real a combustão.

O CM é o ponto de equilíbrio das forças gravitacionais que agem sobre o foguete e está relacionado com a massa de cada parte que o compõe. Sua posição é bem definida e pode ser obtida pela seguinte expressão [1]

$$y_{CM} = \frac{\sum y_i m_i}{\sum m_i}, \quad (1)$$

onde  $y_i$  é a ordenada (ou altura) do CM da parte  $i$  (aleta, nariz, ...) do foguete e  $m_i$  sua massa correspondente. A soma das partes,  $\sum m_i$ , é a massa total do foguete.

Note que explicitamos somente a altura do CM, pois sabemos que o mesmo estará localizado no eixo central do foguete, devido à sua simetria radial. Como o CM é o ponto onde as forças gravitacionais se equilibram, podemos encontrá-lo de maneira mais simplificada sem a necessidade de utilizar a Eq. (1). Basta equilibrar o foguete (na horizontal) sobre uma régua e no momento em que o equilíbrio for estabelecido o CM estará no eixo central do foguete, acima do ponto de contato com a régua (Fig. 6).

Como a propulsão do foguete se dá em sua parte traseira, qualquer perturbação que possa ocorrer, seja por rajadas de vento ou má distribuição de massa, fará com que o foguete gire em torno de seu CM, como se esse ponto fosse um pivô. Uma maneira de perceber facilmente tal fato é tentar empurrar um objeto com o dedo indicador pela sua parte traseira. Observe que qualquer imperfeição da superfície em que o objeto estiver, ou se o ponto de contato entre seu dedo e o mesmo for diferente da reta que contém o CM, fará com que o objeto desvie de sua trajetória inicial em um movimento de rotação em torno de seu CM.

Já que tomamos cuidado com a distribuição de massa do foguete durante a sua montagem, o próximo problema serão os torques provocados pelas forças aerodinâmicas que agem sobre suas partes durante o voo. Isso faz com que o foguete

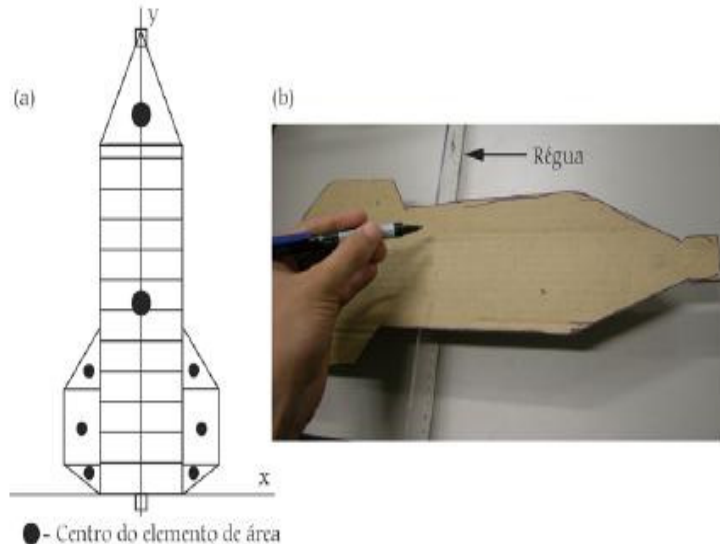


Figura 7. (a) Projete a silhueta do foguete em um papel e divida suas partes em regiões retangulares e triangulares para facilitar a obtenção do CP. (b) Projete a silhueta do foguete em um pedaço de papelão e encontre seu CM; isto fornecerá uma idéia da posição do CP do foguete, que neste caso coincide com o CM do papelão.

gire em uma dada direção, dependendo se a intensidade da pressão exercida pelo ar for maior ou menor na região acima ou abaixo do CM.

Sendo impossível eliminar todos os tipos de perturbações, precisamos fazer com que o foguete corrija sua trajetória retornando à posição vertical da melhor forma possível. Para resolver esse problema recorreremos ao centro de pressão do foguete. O CP é o ponto de equilíbrio das forças aerodinâmicas exercidas sobre as partes do foguete, e é importante por equilibrar os torques gerados por essas forças. Note a semelhança da definição do CM e CP; o que muda é a natureza das forças. O CP está relacionado às formas, textura e área das partes do foguete.

Para encontrar o CP podemos fazer

uma primeira aproximação projetando a silhueta (sombra) do foguete em um papel e dividindo suas partes em áreas retangulares e triangulares, já que as forças aerodinâmicas que definem tal ponto são proporcionadas pela pressão que o ar exerce sobre as áreas de suas diferentes partes. Esta é a vantagem de utilizarmos garrafas de paredes retas, pois áreas de triângulos e retângulos são facilmente obtidas. Uma maneira conveniente de situarmos o sistema de coordenadas sobre a projeção do foguete é mostrada na Fig. 7a. A coordenada  $y$  do CP é dada de maneira semelhante à do CM, ou seja [2]

$$y_{CP} = \frac{\sum y_i A_i}{\sum A_i}, \quad (2)$$

onde  $y_i$  é a coordenada do centro do elemento de área retangular ou triangular  $i$ ,  $A_i$  sua área correspondente e  $\sum A_i$  a soma das áreas dos elementos formados pela projeção do foguete no papel. Novamente utilizamos o argumento de simetria para justificar a ausência do cálculo da coordenada  $x$  do CP.

Assim como utilizamos um artifício para a obtenção do CM sem o uso da Eq. (1), podemos também fazer uma nova aproximação para obtermos o CP sem precisar utilizar a Eq. (2). Podemos projetar a silhueta do foguete em um pedaço de papelão e encontrar seu CM (veja a Fig. 7b), pois nesse caso o centro do elemento de área que corresponde ao CP do plano coincide com seu CM. Note que essas aproximações seriam mais satisfa-

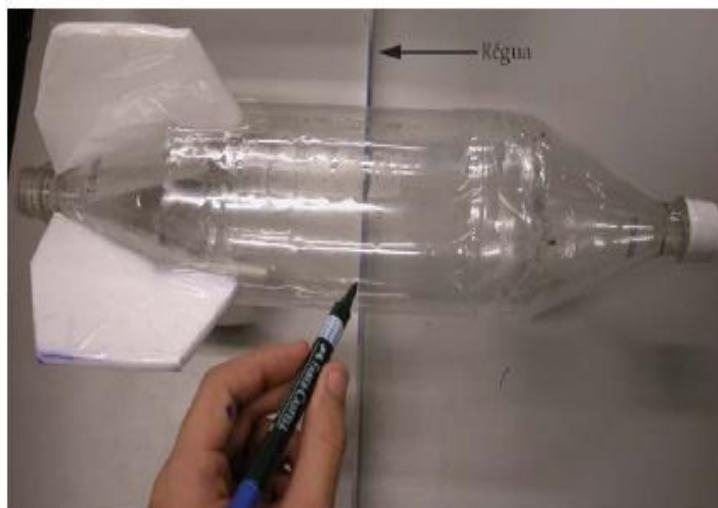


Figura 6. Obtenção simplificada do CM do foguete.

tórias se os materiais que constituem o foguete tivessem a mesma densidade, o que não é o caso, mas podemos utilizá-las para nos fornecer uma boa idéia da posição desse ponto de equilíbrio sem muito trabalho.

Para que haja boa estabilidade do foguete é preciso que o CM esteja a 1,5 cm [2], ou mais, acima do CP. Se durante a montagem não foi possível obter esta configuração, não é necessário refazer o foguete. Pode-se utilizar o nariz do mesmo como compartimento de carga, acrescentando pequenos pesos em seu interior e fazendo com que seu CM seja deslocado para cima. É importante que os pesos fiquem uniformemente distribuídos. Outra maneira é trocar as aletas do foguete por aletas mais largas ou alongadas, fazendo com que o CP se desloque para trás. Deve-se tomar cuidado nesse procedimento, pois se o material das aletas for pesado deslocaremos também o CM do foguete para trás, podendo acarretar uma não alteração da distância entre os pontos de equilíbrio (CM e CP). Não é interessante que a distância entre o CM e CP seja muito grande,  $\gg 1,5$  cm, pois o foguete pode ficar oscilando sua parte traseira no ar, como se estivesse "rebolando" devido às rápidas correções que ele realiza tentando voltar para a posição vertical. Mas a que se devem estas correções durante o voo?

A força de impulsão do foguete é dada na direção vertical ascendente na linha que contém o seu CM, enquanto as forças aerodinâmicas (atrito do ar) agem no sentido contrário, para baixo, na posição de seu CP. Como já adiantamos anteriormente, qualquer perturbação pode fazer com que o foguete gire em torno de seu

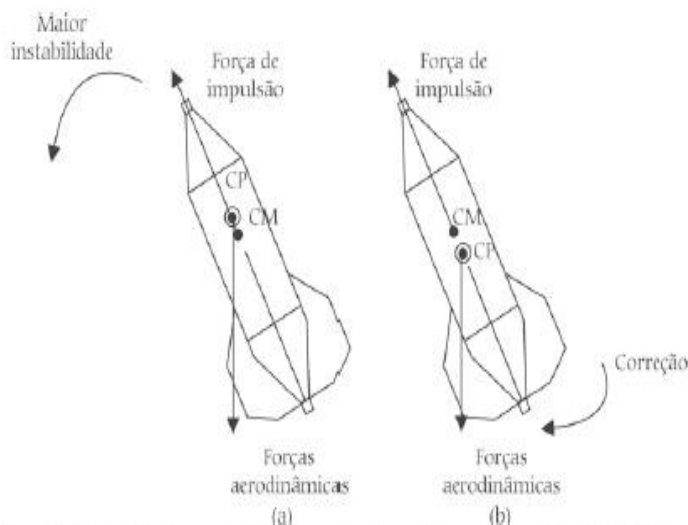


Figura 8. (a) Posição incorreta do CM em relação ao CP causando maior instabilidade no foguete durante o voo. (b) Posição correta entre CM e CP, causando a correção durante o voo.

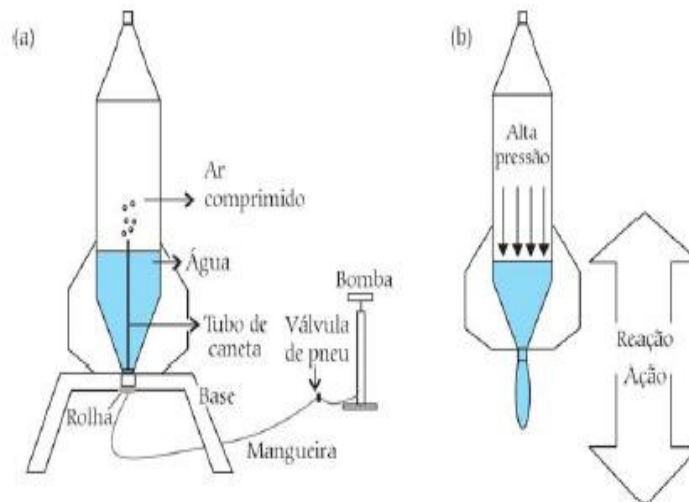


Figura 9. (a) Ilustração da montagem final do foguete para o lançamento. (b) Terceira lei de Newton durante a ascensão do foguete.

CM. Caso seu CP esteja posicionado acima do CM, as forças aerodinâmicas contribuirão para a rotação do foguete, desestabilizando completamente seu voo (Fig. 8a). Mas, pelo contrário, se o CP estiver abaixo do CM, as forças aerodinâmicas atuarão no foguete "puxando" sua parte traseira novamente para a vertical e fazendo a correção desejada, mantendo sua trajetória inicial (Fig. 8b).

### Lançamento

O voo de um foguete real se dá pela queima de combustível. A explosão faz com que haja ejeção dos gases provenientes da combustão em sentido contrário ao do movimento do foguete, impulsionando-o para frente. Na nossa montagem, a água substitui os gases quentes e sua ejeção se dá pela compressão do ar em vez

de explosão. Para o lançamento do foguete siga os seguintes passos:

1° - Pegue o foguete e preencha-o com um pouco de água. Procure otimizar a quantidade para maior ascensão do foguete, pois acrescentando-se muita água ele ficará pesado, dificultando sua subida; com pouca água não haverá propulsão suficiente para subidas longas.

2° - Em seguida encaixe a rolha com o tubo de caneta no bocal da garrafa, vedando-a para que a água não derrame. A rolha deve ficar bem apertada, pois esse será um dos fatores mais importantes para maior ascensão do foguete.

3° - Feito isso é só bombear o ar para dentro da câmara de compressão até que o foguete seja lançado.

Um esquema final da montagem está ilustrado na Fig. 9a.

Mas qual a física envolvida no lançamento?

O que temos é uma aplicação direta da conhecida lei da ação e reação ou terceira lei de Newton. Ao bombarmos o ar para dentro da câmara de compressão, o mesmo vai se comprimindo e exercendo uma força (pressão) cada vez maior sobre a superfície da água ali contida. No momento em que essa força se torna maior que a força de atrito que mantém a rolha presa à garrafa, a rolha e a água saem com uma velocidade muito grande, ação, fornecendo ao foguete um impulso vertical em sentido contrário e possibilitando o seu voo, reação, ou seja, a água dá um "empurrão" no foguete (Fig. 9b). Em física dizemos que há uma transferência de momento linear da água para o foguete.

Você poderia perguntar: por que não lançar somente uma garrafa PET para reproduzir o voo de um foguete? A resposta é simples; uma garrafa sem as aletas

e o nariz seria lançada como um projétil seguindo uma trajetória parabólica e girando em torno de seu CM. Pode-se mostrar este fato para enfatizar a importância dos aparatos acrescentados para que se tenha estabilidade e reprodução do vôo de um foguete real.

A seguir, exploraremos um pouco mais a física para obtermos uma aproximação da aceleração que o foguete pode atingir durante a ejeção de água e sua velocidade ao final desse processo pelo cálculo da velocidade de escape da água.

### Movimento do foguete durante a ejeção de água

Para os cálculos a seguir será preciso acrescentar um dispositivo à montagem, que é um manômetro (medidor de pressão) acoplado à bomba, pois precisaremos da magnitude desta grandeza para obtenção da velocidade de escape da água.

O movimento do foguete durante o lançamento pode ser entendido pela aplicação da segunda lei de Newton [3]

$$\sum F = \frac{\Delta p}{\Delta t} \quad (3)$$

Para sua descrição, consideremos que a única força atuante sobre o foguete é a força gravitacional (desprezemos o atrito do ar). Imaginemos que o foguete está em movimento inicial uniforme, com velocidade constante  $v$ . Na realidade a velocidade é zero, pois o foguete está parado sobre a base de lançamentos, mas utilizaremos este artifício para manipulações matemáticas mais simples. O momento linear inicial do foguete será então  $p_i = Mv$ , onde  $M$  é sua massa inicial que é dada por  $M = m_p + m_{H_2O}$ , ou seja, a massa do foguete vazio ( $m_p$ ) mais a massa de água contida em seu interior ( $m_{H_2O}$ ), como mostra a Fig. 10a. No momento em que ocorre a ejeção de uma pequena quantidade de água  $\Delta m_{H_2O}$  a uma velocidade  $v_f$ , a velocidade do foguete é alterada de  $\Delta v$  (Fig. 10b). Logo, o sistema terá um momento final dado por [3]

$$p_f = (M - \Delta m_{H_2O}) \cdot (v + \Delta v) - \Delta m_{H_2O} v_f \quad (4)$$

Se  $\sum F = -Mg$ , substituindo a Eq. (4) na Eq. (3) obtemos [3]

$$-Mg = \frac{(M - \Delta m_{H_2O})(v + \Delta v) - \Delta m_{H_2O} v_f - Mv}{\Delta t} \quad (5)$$

Manipulando esta equação e desprezando o termo  $\Delta m_{H_2O} \Delta v$  já que  $\Delta m_{H_2O}$  é muito pequeno, obtemos para a velocidade do foguete  $\Delta v$  [3]

$$\Delta v = -g \Delta t + \frac{\Delta m_{H_2O}}{M} u, \quad (6)$$

onde  $u$  é a velocidade de escape da água relativa ao foguete,  $u = v + v_f$ . Utilizando as quantidades  $\Delta m_{H_2O} = \rho \Delta V$  e  $M = \rho V_{H_2O} + m_p$ , onde  $\rho$  é a densidade da água,  $\Delta V$  a mudança no volume de ar dentro do foguete,  $V_{H_2O}$  o volume de água dentro do foguete e  $m_p$  a massa do foguete vazio, temos [3]

$$\Delta v = -g \Delta t + \left( \frac{\rho \Delta V}{\rho V_{H_2O} + m_p} \right) u. \quad (7)$$

Podemos obter a velocidade do foguete durante o tempo  $\Delta t$  de ejeção da água conhecendo-se a velocidade de escape da água  $u$  em relação ao foguete. Uma maneira de determinar  $\Delta t$  é lançar o foguete em frente a um anteparo como um muro ou pilastra, de modo que possamos estabelecer uma escala e utilizar uma câmera digital qualquer para filmar o momento do lançamento. Em seguida é só separar o filme em quadros (*frames*), utilizando algum programa de edição de vídeo (utilizamos o VirtualDub 1.3c, que pode ser encontrado gratuitamente na internet), desde o momento em que o foguete deixa a base até o momento em que ocorre toda ejeção de água. O intervalo de tempo de um quadro para outro é mostrado no programa e é da ordem de milésimos de segundo.

Para obtermos  $u$ , vamos considerar a água como um fluido perfeito e incompressível e seu escoamento pelo tubo (foguete) estacionário. Utilizando a equação

de Bernoulli, temos [4]

$$\frac{1}{2} \rho v_i^2 + P = \frac{1}{2} \rho u^2 + P_{atm} \quad (8)$$

onde as quantidades apontadas no primeiro membro da Eq. (8) estão relacionadas à quantidade de água no interior do foguete, ou seja, sua densidade  $\rho$  e sua velocidade  $v_i$ , a pressão  $P$  em sua superfície. No segundo membro estão as quantidades relacionadas à porção de água que é ejetada do foguete, que são sua velocidade relativa  $u$ , a qual queremos encontrar, e a pressão atmosférica  $P_{atm}$  no bocal da garrafa. Note que estamos desprezando a parte da energia potencial gravitacional da equação de Bernoulli, pois sua magnitude é desprezível comparada com as outras grandezas envolvidas.

Ambas as velocidades  $u$  e  $v_i$  estão relacionadas com a taxa com que a água é ejetada, ou, equivalentemente, à taxa com que o volume de ar  $V$  dentro da câmara aumenta. Esta relação é dada pela equação de continuidade [3, 5]

$$\frac{\Delta V}{\Delta t} = \frac{1}{4} u \pi D_b^2 = \frac{1}{4} v_i \pi D_f^2, \quad (9)$$

sendo  $D_b$  e  $D_f$  os diâmetros do bocal e do corpo da garrafa, respectivamente. A Fig. 10c ilustra as grandezas apresentadas nas Eqs. (8) e (9).

A Eq. (9) mostra que a vazão na área dada pela parte interna da câmara de compressão, corpo do foguete, deve ser a mesma na área dada pelo bocal, pois estamos

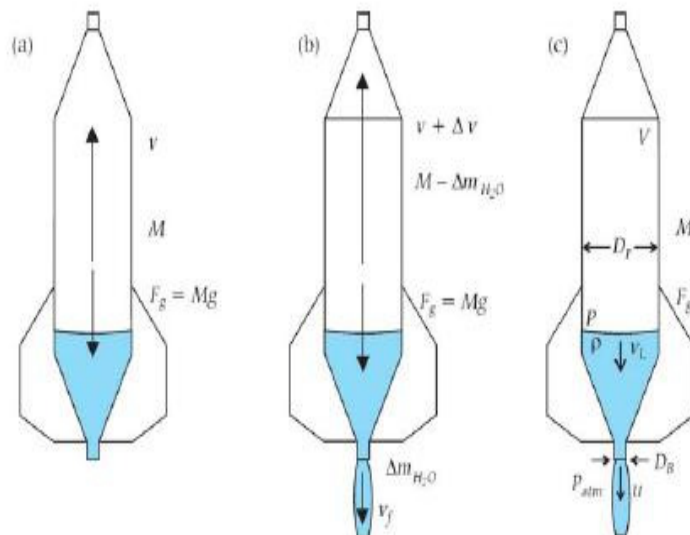


Figura 10. (a) Configuração do foguete no momento em que não é ejetada nenhuma quantidade de água; sua massa é  $M$  e sua velocidade é  $v$ . A única força atuante é a força gravitacional,  $F_g$ . (b) Configuração do foguete após a ejeção de uma pequena quantidade de água com massa  $\Delta m_{H_2O}$  e velocidade  $v_f$ . A massa do foguete muda para  $M - \Delta m_{H_2O}$  e sua velocidade para  $v + \Delta v$ . (c) Mostra-se o volume  $V$  de ar dentro do foguete;  $P$ , a pressão sobre a superfície da água;  $D_f$ , o diâmetro do foguete;  $D_b$ , o diâmetro do bocal;  $\rho$ , a densidade da água;  $v_i$ , a velocidade da água dentro do foguete;  $u$ , a velocidade de escape da água em relação ao foguete e  $P_{atm}$ , a pressão atmosférica.

tratando a água como um fluido incompressível. Isso justifica o fato da velocidade da água no bocal da garrafa (menor área) ser bem maior que em seu interior (maior área). Este fato é interessante, pois é observado no dia a dia quando em um encanamento de uma residência a água flui de um cano de maior diâmetro para um de menor diâmetro. É comum ouvirmos que a água sai com maior pressão. O que ocorre realmente é que a água sai com maior velocidade, o que implica em uma menor pressão nas paredes do cano ou torneira em que a água sai. Este é o famoso fenômeno de Venturi. Essa confusão é comum pelo fato das pessoas associarem a maior transferência de momento da água que sai com maior velocidade sobre nossa mão. Quando colocado desta forma, podemos dizer que ocorre maior pressão, mas na superfície em que a água está colidindo, e não nas paredes do cano ou torneira por onde a água sai. Portanto, se alguém perguntar qual procedimento deveríamos tomar para aumentar a pressão da água na torneira de sua casa, não cometa o erro de dizer que é só diminuir o diâmetro do cano de saída. O que se deve fazer é aumentar a altura da caixa d'água, o que equivale a aumentar a coluna de água sobre o ponto de saída (torneira) e conseqüentemente a força aplicada sobre este ponto, mas esta já é outra história; vamos retornar ao foguete.

Da Eq. (9) observa-se que  $v_c$  é proporcional à razão  $D_b/D_f$ , que por sua vez é muito menor que 1, tornando-se menor ainda quando elevada à quarta potência na Eq. (8). Logo, podemos desprezar o primeiro termo da Eq. (8), o que nos permite obter a expressão para a velocidade de escape da água, que é dada por [3]

$$u = \sqrt{\frac{2(P - P_{atm})}{\rho}} \quad (10)$$

Quando a garrafa retorna ao solo observa-se que há vapor de água dentro da mesma, e isso implica que houve resfriamento do ar dentro da garrafa no momento de sua expansão. Como  $\Delta t$  é muito pequeno, significa que este processo de expansão pode ter ocorrido sem trocas de calor entre o sistema, câmara de compressão e a vizinhança. Portanto podemos supor que houve uma expansão adiabática. Admitindo que o ar seja um gás ideal, temos [3]

$$P = P_0 \left( \frac{V_0}{V} \right)^\gamma \quad (11)$$

onde  $P_0$  é a pressão absoluta inicial dentro do foguete,  $V_0$  o volume inicial de ar dentro do mesmo e  $V$  seu volume final, que é

o volume da garrafa. Como o ar pode ser considerado um gás diatômico, temos que  $\gamma = 1,4$  [4]. Substituindo a Eq. (11) na Eq. (10), obtemos finalmente, para a velocidade de escape da água,

$$u = u_c \sqrt{\left( \frac{V_0}{V} \right)^\gamma - \frac{P_{atm}}{P_0}} \quad (12)$$

onde  $u_c$  é a velocidade característica dada por

$$u_c = \sqrt{\frac{2P_0}{\rho}} \quad (13)$$

Calculando  $u$  pela Eq. (12) e substituindo na Eq. (6), pode-se obter a velocidade do foguete no momento em que ocorre toda ejeção de água (Eq. (14)) e estimar sua aceleração durante o processo que, dependendo da pressão imposta, pode ser da ordem de dezenas de vezes a aceleração da gravidade; um resultado realmente incrível utilizando apenas garrafas PET, água e ar comprimido.

$$\Delta v = -g\Delta t + u_c \left[ \left( \frac{\rho\Delta V}{\rho V_{H_2O} + m_f} \right) \cdot \sqrt{\left( \frac{V_0}{V} \right)^\gamma - \frac{P_{atm}}{P_0}} \right] \quad (14)$$

Nesta simples descrição, a pressão máxima que conseguimos colocar na câmara do foguete foi de aproximadamente  $(5,5 \times 10^5)$  Pa ou 80 psi.

Para essa pressão e uma quantidade de água de 600 ml, o tempo de ejeção total foi de 80 ms, como pode ser observado na seqüência de quadros apresentados na Fig. 11. Note que a nitidez do foguete torna-se pequena pelo fato de não trabalharmos com uma câmera profissional e sua velocidade ser muito alta, mas é possível termos uma idéia de sua evolução. Realizamos o experimento em frente a uma torre cujas partições são de precisamente

2 m. A velocidade  $u$  calculada pela Eq. (12) foi obtida a partir dos dados a seguir:

- $\rho$  = densidade da água ( $1000 \text{ kg/m}^3$ )
- $V_0$  = volume inicial de ar dentro do foguete; como utilizamos 600 ml de água temos que  $V_0 = 1,4 \text{ l}$ . Conversão de unidades:  $1 \text{ l} = 10^{-3} \text{ m}^3$
- $V$  = volume total da câmara de compressão do foguete ( $\approx 2 \text{ l}$ )
- $V_{H_2O}$  = volume de água ( $\approx 600 \text{ ml}$ )
- $D_b$  = diâmetro do bocal da garrafa ( $\approx 1,5 \text{ cm}$ )
- $D_f$  = diâmetro da câmara de compressão do foguete ( $\approx 11,0 \text{ cm}$ )
- $m_f$  = massa do foguete vazio ( $\approx 0,081 \text{ kg}$ )
- $P_{atm}$  = pressão atmosférica ( $\approx 1,05 \times 10^5$  Pa ou 14,7 psi)
- $P_0$  = pressão absoluta inicial dentro do foguete ( $5,5 \times 10^5$  Pa ou 80 psi)
- $g$  = aceleração da gravidade,  $9,81 \text{ m/s}^2$
- $\Delta t = 80 \text{ ms}$  ou  $0,08 \text{ s}$ .

O resultado obtido foi  $u = 33 \text{ m/s}$  o que nos fornece uma velocidade para o foguete de  $\Delta v = 20 \text{ m/s}$ , que é a velocidade máxima que o foguete atinge durante todo processo de vôo. A partir do momento em que a água é totalmente ejetada, o foguete fica sujeito às forças da gravidade e abrito do ar. Daí podemos estimar sua aceleração, que é  $a = 25 \text{ g}$ , um resultado realmente fascinante. Nessa configuração o foguete atingiu uma altura aproximada de 30 m, resultado estimado pela filmagem. Portanto deve-se tomar cuidado e realizar lançamentos em locais abertos como campos de futebol ou praças, onde não existam pessoas ou carros que possam ser atingidos pelo foguete na descida, uma vez que a velocidade com que o foguete chega ao solo também é muito grande. É interessante manter a tampa da garrafa no nariz do foguete, pois ela o protege no momento em que o mesmo choca-se com o solo.

O modelo para obtenção da velocidade

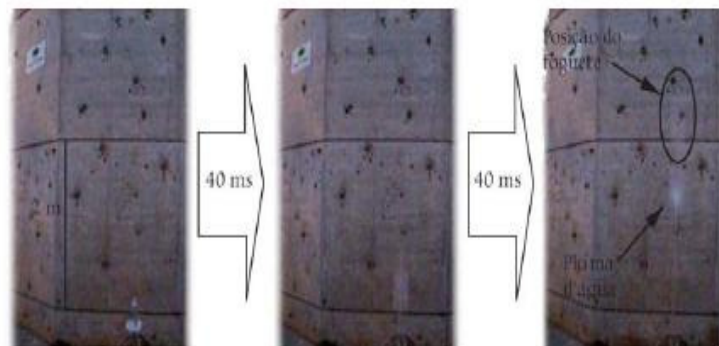


Figura 11. Tempo em que a água é totalmente ejetada do foguete  $\Delta t = 80 \text{ ms}$ , correspondendo a uma altura de aproximadamente 1,80 m que é o espaço em que o foguete é acelerado. Note a formação de uma pluma d'água ao final da ejeção e a difícil definição do formato do foguete (elipse), devido à sua altíssima velocidade,  $\Delta v = 20 \text{ m/s}$  nessa posição, obtida pela Eq. (14).

do foguete não é tão ruim, pois na análise dos quadros mostrados na Fig. 11 o foguete percorreu uma distância de 1,8 m em 0,08 s o que dá uma velocidade média de  $v_M = 22,5$  m/s (desprezando o atrito, a gravidade e até mesmo as dimensões do foguete, ou seja, é a velocidade média de um ponto material).

Pode-se otimizar os resultados obtidos fazendo um sistema de gatilho para possibilitar o aumento de

pressão dentro da câmara do foguete e dispará-lo manualmente, à distância, é claro, ou pesquisar materiais que proporcionem um foguete mais leve fazendo com que

o mesmo voe a alturas bem maiores. Não foi verificado o limite de pressão que as garrafas PET podem suportar, mas é aconselhável não ultrapassar 130 psi, pois, apesar do material que constitui as garrafas ser de grande resistência, é aconselhável respeitar certos limites para evitar

**O foguete de garrafa PET aborda uma grande quantidade de fenômenos físicos, e assim destacamos que o professor nunca deve desprezar a simplicidade e a importância de um experimento**

eventuais acidentes. Vemos então que a física quando entendida e bem manipulada pode ser muito poderosa e divertida.

### Conclusão

Note a quantidade de fenômenos físicos que foi possível abordar em uma simples brincadeira de baixíssimo custo levada a cabo em um final de semana, com resultados incrivelmente chocantes. É im-

portante que nas aulas de física sejam trabalhadas ordens de grandezas de quantidades que pretende-se determinar para que os alunos tenham uma noção mais palpável da ciência.

Para isso não é necessário que se tenha precisão exata, basta ter-se uma idéia do que está acontecendo, e a experimentação é uma ferramenta essencial para estes fins. O professor de física nunca deve desprezar a simplicidade e a importância de um experimento, pois este pode despertar o

interesse de alunos que provavelmente farão história na ciência. Quem sabe, com esta brincadeira do foguete possam surgir futuros colaboradores para o programa espacial brasileiro.

### Referências

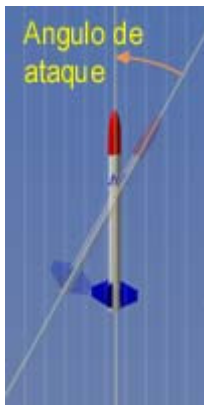
- [1] D. Halliday, R. Resnick e J. Walker, *Fundamentos de Física - Mecânica* (Livros Técnicos e Científicos Editora S.A., Rio de Janeiro), v. 1, 4ª ed.
- [2] S.A. Widmark, *The Physics Teacher* **36**, 148 (1998).
- [3] D. Kagan, L. Buchholtz and L. Klein, *The Physics Teacher* **33**, 159 (1995).
- [4] H. Moysés Nussenzveig, *Curso de Física Básica - Fluidos, Oscilações, Ondas e Calor* (Editora Edgard Blücher LTDA, 2002), v. 2, 4ª ed.
- [5] D. Halliday, R. Resnick e J. Walker, *Fundamentos de Física - Gravitação, Ondas e Termodinâmica* (Livros Técnicos e Científicos Editora S.A., Rio de Janeiro), v. 2, 4ª ed.

## Como funciona a estabilidade?

Uma garrafa nua pode ser lançada como foguete, mas ela certamente vai girar e rolar, o que causará, dentre outras coisas, um **arrasto** (força que tende a empurrar o foguete para trás) muito maior do que outra garrafa que consegue manter-se com o nariz sempre apontado **para frente**. Note que eu não disse "para cima". Se você conseguir entender a diferença, seus foguetes serão sempre um sucesso. Vamos lá.

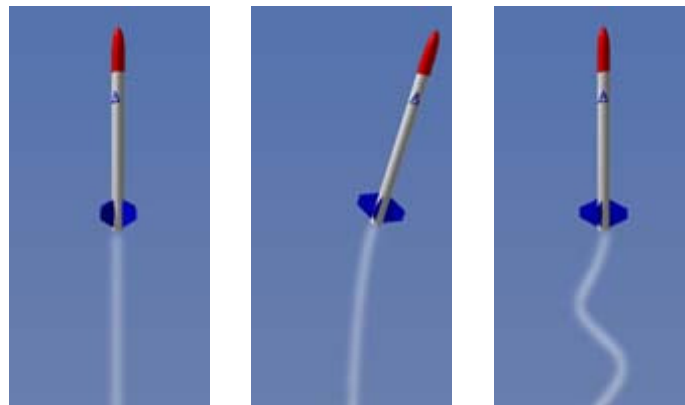
### Ângulo de ataque

Os foguetes são veículos projetados para se deslocar numa direção vertical (ou o mais próximo possível dela), vencendo a força da gravidade, diferentemente de aviões, que têm asas e superfícies móveis de controle que produzem sustentação e que permitem que eles voem na horizontal.



Nossos foguetes, portanto, terão melhor desempenho sempre que se deslocarem da maneira mais alinhada com o fluxo de ar quanto possível. Chamamos de ângulo de ataque àquele formado pela posição da fuselagem do foguete em relação ao fluxo de ar produzido pelo seu deslocamento. Quanto menor for esse ângulo, mais alinhado o foguete estará.

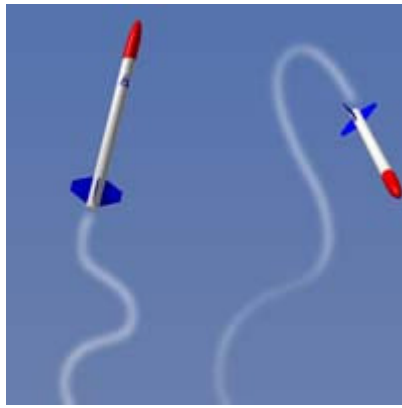
Imagine um foguete se deslocando pelo ar (sem vento). O ar passa alinhadamente ao longo do corpo. Se essa situação não for perturbada, o foguete permanecerá voando na mesma direção. Essa é a sua **atitude neutra**.



*Atitude neutra    Atitude perturbada    Atitude estável*

Se o foguete for perturbado, por exemplo, por uma rajada de vento ou uma aleta desalinhada, ele assumirá uma posição de ângulo de ataque maior que zero. Um foguete de **atitude estável** (com estabilidade) faz correções contínuas durante seu vôo, oscilando e tentando manter o ângulo de ataque sempre em zero. É muito parecido com as correções que você tem que fazer quando anda de bicicleta.

Entretanto, se ele começa a voar em ângulos cada vez maiores e eventualmente dá cambalhotas no ar ele tem uma **atitude instável** (sem estabilidade). Por outro lado, um foguete que esteja **neutramente estável** (sem oscilar), continuará voando na mesma direção, mesmo que tenha um ângulo de ataque maior que zero.



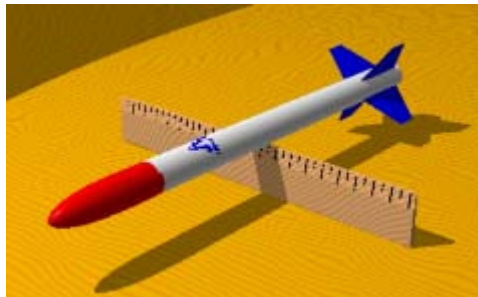
*Atitude instável*



*Atitude neutramente estável*

Há dois fatores principais que influenciam a estabilidade de vôo de nossos foguetes: o centro de gravidade (CG) e o centro de pressão (CP). Para que um foguete tenha uma atitude estável (capaz de fazer as devidas correções durante o vôo), **o CG deve estar à frente do CP**. Nunca esqueça dessa regra!

## Centro de gravidade

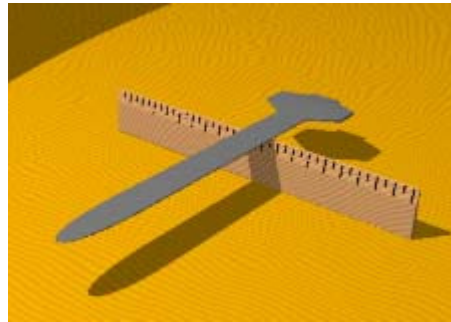


*Equilibrando o foguete*

O centro de gravidade de um foguete é muito fácil de ser encontrado. Basta simplesmente que você equilibre-o (todo carregado exceto pela água) em cima de uma régua ou algo parecido colocada na perpendicular da fuselagem. O ponto no qual o foguete ficar na horizontal indica o centro de gravidade (na verdade ele estará no interior do foguete, mas não faz mal que a gente use a circunferência externa como referência).



## Centro de pressão



*Equilibrando a silhueta*

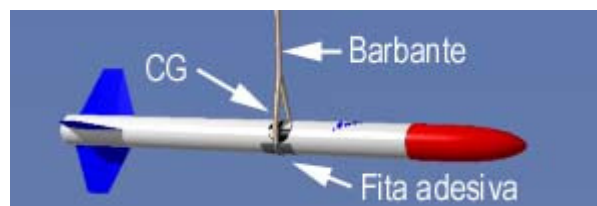
O centro de pressão é mais difícil de se achar. O CP funciona do mesmo jeito que o CG, exceto que as forças envolvidas são aerodinâmicas, em vez de gravitacionais. Elas decorrem da pressão que o ar faz ao passar pelas várias partes do foguete durante o vôo e o CP é o ponto onde a pressão parece estar mais concentrada. O cálculo dessas forças é uma tarefa complicadíssima. Na minha lista de endereços há uma seção dedicada a sites que apresentam as fórmulas e os modelos matemáticos necessários para quem quiser se aprofundar mais no assunto.

Felizmente temos uma forma alternativa que, embora não tenha precisão suficiente para lançar grandes foguetes, funciona muito bem com nossos veículos menores. Desenhe a silhueta exata do seu foguete num papelão. Não é preciso ser em tamanho real, basta que esteja em escala. Recorte-a e equilibre-a do mesmo jeito que você fez para achar o CG. Marque o local de equilíbrio e transfira-o para o foguete.

## Túnel de vento

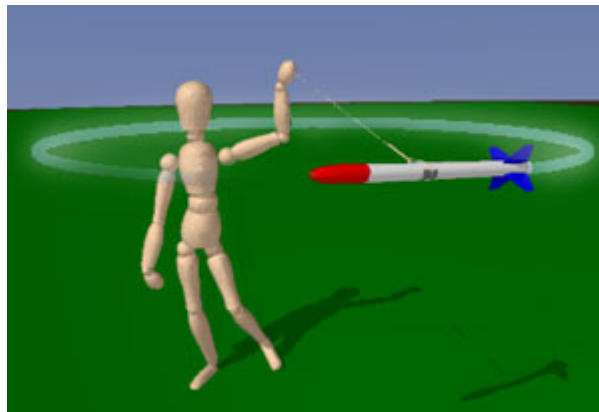
As grandes empresas aeroespaciais possuem túneis de vento (equipamentos que simulam a passagem do veículo pelo ar) que são ao mesmo tempo caríssimos e muito precisos. Para nossos foguetes não precisamos de tamanha precisão, nem dispomos de grandes quantias. Assim, temos que fabricar nosso próprio equipamento. Felizmente, com um pouco de engenhosidade, podemos ter a mesma funcionalidade no aparato que está descrito a seguir.

Prepare seu foguete para lançamento, mas não ponha a água. Amarre um pedaço de cerca de 2,5m de barbante na fuselagem, na altura do centro de gravidade e fixe a volta do barbante com uma fita adesiva, para não deslizar.



*Prenda um barbante com fita adesiva no ponto do centro de gravidade.*

Segure o foguete pelo barbante a 1m de distância, aponte o nariz do foguete para a direção para onde você vai girar e comece um movimento giratório por cima de sua cabeça.



*Gire o foguete em torno de você*

À medida em que o foguete for aumentando a velocidade, vá liberando mais barbante até que ele fique a uma distância de cerca de 2m de você. Se o nariz do foguete continuar apontando para a direção do giro, sem virar ao contrário nem ficar de lado, você pode ter certeza que seu foguete está estável e seguro para vôo.

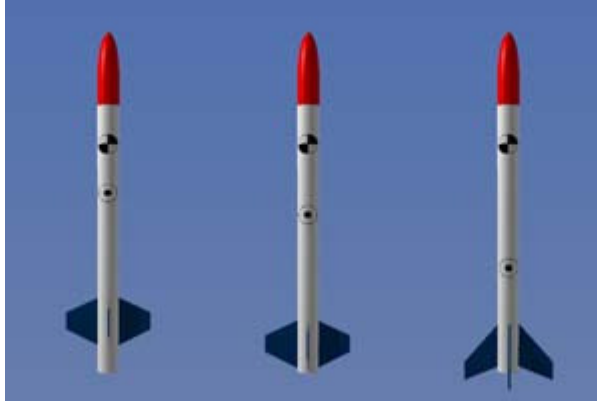
Não se preocupe se no início ele estiver instável. A velocidade inicial do giro ainda é muito menor do que a velocidade real de lançamento e as forças aerodinâmicas ainda não estão atuando fortemente. Quanto mais rápido você conseguir girar, mais próximo da situação real será o teste.

Na verdade, o nosso túnel de vento pode até ser sensível demais, em decorrência da baixa velocidade alcançada. Um foguete que consiga passar marginalmente no teste de estabilidade muito provavelmente fará sempre vôos estáveis.

Caso o foguete apresente um comportamento super estável durante o teste, você poderá ter exagerado e deixado seu foguete estável demais. A principal consequência disso é que ele terá uma forte tendência de virar em direção ao vento, ou "orçar", na linguagem náutica.

## **Ajustes**

Uma forma de corrigir instabilidade é fazer com que o CP seja levado mais para trás. Consegue-se isso deslocando-se as aletas mais para trás ou fazendo-as mais alongadas nessa mesma direção.



*Altere a posição e a forma das aletas para levar o CP para trás*

Também pode-se fazer com que o CG seja levado mais para frente. Basta adicionar pesos ao nariz. Esse peso pode ser em forma de chumbadas de pescaria ou simplesmente de água adicionada a um eventual compartimento superior do foguete.



*Adicionar peso ao nariz, leva o CG para a frente*

## Como funciona a propulsão?

Que os foguetes a água são movidos "a água", isso está muito claro. Mas como é mesmo que isso funciona? Será que quanto mais água ele tiver mais alto ele subirá? Na verdade, não. Veja só:

### Inércia

A Lei da Inércia diz que "Qualquer corpo em movimento continuará se movendo e qualquer corpo parado permanecerá parado até que alguma força externa aja sobre ele". Em outras palavras, **inércia** é a tendência que os objetos têm de resistir a mudanças no movimento. Ela tem a ver com a **massa** do objeto (a qual os não-foguetistas chamam de "peso").



Uma garrafa **mais cheia** tem **mais inércia**, pois possui **mais massa**. Mais inércia quer dizer **mais resistência** a mudanças de direção. O vento precisa trabalhar mais para alterar o curso da garrafa.



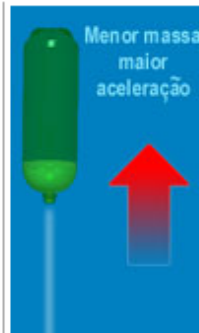
Uma garrafa menos cheia tem menos inércia, pois possui menos massa. Menos inércia quer dizer menos resistência a mudanças de direção. Com pouca força o vento empurra a garrafa para outro curso.

## Segunda Lei de Newton

A Segunda Lei de Newton diz que a Força aplicada é igual à massa vezes a aceleração, ou:  $F = m \cdot a$ . Se dois foguetes aplicam forças iguais,



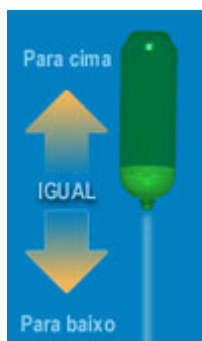
Uma garrafa de **maior massa** (mais cheia) terá uma **menor aceleração**.



Uma garrafa de **menor massa** (menos cheia) terá uma **maior aceleração**.

## Terceira Lei de Newton

A Terceira Lei de Newton diz que "para cada ação, há uma reação de igual intensidade e de sentido oposto". Isso quer dizer que quanto mais água for expelida e quanto mais depressa isso acontecer, maior será a reação da garrafa.



Massa da garrafa e da água x Velocidade da garrafa

É IGUAL A

Massa da água expelida x Velocidade da água expelida

## Empuxo

O empuxo é como chamamos a força que faz subir o foguete. Nos foguetes a água, o ar pressurizado empurra a água para fora, causando uma reação da garrafa em sentido oposto.

Portanto o empuxo depende tanto da velocidade com que a água é expelida quanto do "tamanho" do bocal de saída. Assim, o empuxo pode ser calculado como sendo aproximadamente igual ao dobro do produto da pressão pela área da seção do bocal. Ou seja,  $e = 2 \cdot P \cdot A$ . As unidades são newtons (N) para o empuxo, pascais (Pa) para a pressão e metros (m) para o diâmetro. A área de um círculo é encontrada pela fórmula  $A = \pi \cdot r^2$ . Simplificando:  $e = 1,57 \cdot P \cdot D^2$ , onde D é o diâmetro do bocal. Exemplo:

Uma garrafa PET com 500kPa de pressão  
Bocal comum com 22mm de diâmetro

$$\text{Empuxo} = 1,57 \times 500.000 \times 0,022 \times 0,022 = 380\text{N}$$

**Universidade de São Paulo**  
**Centro de Divulgação Científica e Cultural - Campus São Carlos**  
**Setor de Astronomia**  
**(OBSERVATÓRIO – Centro de Divulgação da Astronomia)**  
**Série Século XX – Astronomia e Astronáutica**  
**Foguetes e Satélites (Breve História)**

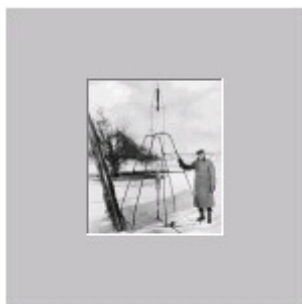
A história da astronáutica começa com o desenvolvimento dos primeiros foguetes e satélites. Não fossem os testes do americano Robert Goddard com o primeiro foguete de combustível líquido da história, que subiu apenas 12 metros em 16 de março de 1926, o homem nunca teria chegado a Lua, os meteorologistas dificilmente teriam emprego, e provavelmente muitas pessoas ainda acreditariam que os marcianos poderiam invadir a Terra a qualquer momento.

Os foguetes são a peça fundamental no desenvolvimento da astronomia, pois lançaram e ainda hoje lançam instrumentos muito poderosos ao espaço, como sondas interplanetárias, que nos revelam os segredos dos planetas mais distantes, telescópios espaciais, que nos revelam os segredos das estrelas e galáxias mais distantes, e satélites voltados para a própria Terra, lembrando-nos que ainda existem muitos segredos a serem revelados aqui mesmo. Como já foi citado, os satélites também são de extrema importância na astronomia, pois orbitando a Terra eles capturam dados científicos impossíveis de serem obtidos do solo

O desenvolvimento de todos esses equipamentos começou no início do século XX, que talvez ficará marcado como "o século em que o homem saiu da Terra". Já que eles são extremamente importantes, nós vamos fazer um resumo de sua evolução ao longo do século.

### **As Idéias**

É óbvio que no começo do século XX já existiam alguns objetos que poderiam ser chamados de foguetes: algumas armas militares e até os fogos de artifício. No entanto, esses foguetes utilizavam combustível sólido (pólvora, por exemplo), e os cientistas que começaram a pensar em utilizar os foguetes para vôos espaciais já sabiam que esses combustíveis não eram poderosos o suficiente. Os foguetes precisariam utilizar combustível sólido. Outro desenvolvimento importante: os foguetes deveriam usar estágios para ir mais longe, ou seja, o foguete teria várias partes, e a medida que ia acabando o combustível de uma parte, ela se desprenderia do conjunto, tornando ele mais leve.



[foguete-e-satelites-fig-01.jpg](#)

11.18 KB

Goddard e o seu primeiro foguete de combustível líquido

Figura-1

Três homens, Goddard, Hermann Oberth (alemão) e Kostantin Tsiolkovsky (russo) trabalharam seriamente na idéia de desenvolver os foguetes, quando a comunidade científica achava que não valia a pena. Os três estudavam seriamente a viabilidade de se construir um foguete espacial, e chegaram a conclusões bem próximas. Nunca se encontraram e desconheciam os trabalhos individuais dos outros demais dois entre si. Isso foi no final do século XIX e começo do século XX, mas eles começaram a apresentar resultados entre 1903 e 1926 (data do teste do foguete de Goddard). Por isso, os três podem ser considerados os pais da astronáutica, apesar de cada um ser considerado pai da astronáutica em seu país.

## **O Desenvolvimento**

Foi apenas em 30 de maio de 1942 que foi lançado o primeiro foguete com capacidade para sair realmente da atmosfera: o V-2 alemão. Esse foguete foi desenvolvido por um aluno de Oberth: o alemão Werhner Von Braun. O foguete foi projetado para servir de arma na Segunda Guerra Mundial, e grande parte dos cientistas foram obrigados a trabalhar no projeto –inclusive Von Braun, que chegou a ser preso por estar fazendo pesquisas que se desviavam de fins militares, mas ele foi logo solto porque os alemães perceberam que ele era essencial ao projeto.

O foguete chegou a ser usado na guerra, contra Londres e Paris, por exemplo, e apesar de ter matado milhares de pessoas não impediu a derrota dos alemães, pois ficou pronto muito tarde.

Com o fim da guerra, a equipe de Von Braun foi para os Estados Unidos como prisioneira de guerra. Era isso ou ficarem na Alemanha e serem mortos, pois Hitler já havia ordenado a execução deles, para que a tecnologia dos V-2 não se espalhasse a outros países.

Nos Estados Unidos a equipe foi obrigada a continuar o desenvolvimento dos V-2, o que fizeram. Eles então desenvolveram o Bumper, primeiro foguete de dois estágios a ser lançado (em 1948), que usava o V-2 como primeiro estágio.

Enquanto isso, os russos trabalhavam no projeto de um ICBM (sigla pra míssil balístico intercontinental, em inglês), que chamaram de R-7. Ele era bem parecido com o V-2, pois os primeiros projetos russos eram baseados nos projetos alemães. Alguns chegavam a ser cópia, onde os engenheiros russos trocavam apenas o texto, deixando o

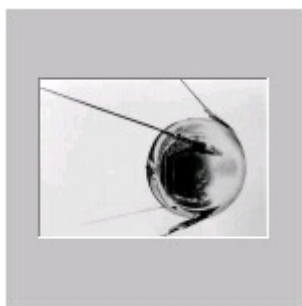
desenho original alemão. Em 1957 os russos lançam com sucesso o R-7, primeiro míssil intercontinental da história.

Os americanos, sabendo do trabalho dos russos, desenvolveram com urgência o seu ICBM: o Atlas, lançado cerca de quatro meses depois do R-7 russo.

Esses dois foguetes resumem bem o início da astronáutica: os foguetes eram desenvolvidos como armas, e depois usados como veículos lançadores, como os Atlas, R-7, Titan (americanos) e a série UR (Universal Rockets – foguetes universais) russa. Todos eles passaram a ser utilizados como foguetes lançadores, e são usados em lançamentos de naves e satélites até hoje, em versões melhoradas.

Um fato curioso é que todos os foguetes, mesmo hoje em dia, seguem os mesmos padrões, sejam eles americanos, russos ou de outro país. Isso acontece porque os foguetes se desenvolveram do V-2 alemão, já que as pesquisas continuaram, com a mesma equipe, nos Estados Unidos, e já que os russos tinham bastante informações sobre o desenvolvimento científico alemão. Esses fatos fizeram com que atualmente os foguetes sejam bem parecidos entre si.

O ano de 1957 é um ano marcante na história da astronáutica: em outubro desse ano foi lançado o Sputnik 1, primeiro objeto feito pelo homem colocado em órbita terrestre, em outras palavras, o primeiro satélite artificial lançado pelo homem. O Sputnik era um satélite russo, pesando cerca de 84 kg e feito as pressas para poder ser lançado antes do satélite que os americanos estavam desenvolvendo. De fato os russos conseguiram lançar o Sputnik primeiro, mas a única coisa que esse satélite fazia era emitir sons em determinadas frequências, que podiam ser captados por rádio-receptores aqui na Terra – apenas para provar que ele estava lá. Ainda assim o satélite chegou a causar pânico em muitos americanos, pois eles não sabiam do que o satélite era realmente capaz. Resumindo, apesar de o Sputnik ter colocado os russos na frente na corrida espacial, a única coisa que ele fazia era barulho.



[foguetes-e-satelites-fig-02.jpg](#)

[9.15 KB](#)

O Sputnik - Primeiro Satélite Artificial

Figura-2

Cerca de três meses depois do Sptunik, os americanos lançavam seu primeiro satélite: o Explorer 1, bem mais leve que seu concorrente (pesava apenas 14 kg) e bem mais útil também: foi o responsável pela descoberta do Cinturão de Van Allen um cinturão magnético que protege a Terra da radiação solar.



A largada tinha sido dada: agora americanos e russos tinham tecnologia para lançar objetos ao espaço. A partir daí, a revolução da astronomia tomou uma velocidade realmente astronômica, como lhe cabe.

Muitos satélites passaram então a ser lançados. Os primeiros a serem desenvolvidos foram os satélites para fins militares. Existem vários tipos desses satélites: uns tiram fotos do terreno inimigo, outros são responsáveis pela comunicação entre as tropas e alguns até pela interceptação da comunicação entre tropas inimigas. Ainda em 1958 foi lançado o primeiro satélite espião. Vieram então os satélites meteorológicos: em 1960 os americanos lançaram o primeiro desse tipo. Cada vez mais poderosos, eles nos dão previsões de tempo cada vez mais precisas, apesar de esta ser uma área muito complicada da ciência. Em 1962, foi lançado o primeiro satélite para transmissão de televisão intercontinental. Os satélites de comunicação são hoje extensamente utilizados e eles que nos permitem, por exemplo: assistirmos as Olimpíadas ao vivo, nem que para isso tenhamos que ficar acordados a madrugada inteira.

Para que alguns satélites pudessem ser realmente eficientes, foram desenvolvidos os satélites geoestacionários: satélites que parecem estarem parados no céu. Esses satélites na verdade são colocados em órbitas bem altas ao redor do equador, e giram junto com a rotação da Terra, estando então em posição fixa em relação a quem estiver na superfície terrestre.

A intensa corrida espacial durante a Guerra Fria ajudou muito toda essa evolução, e foi responsável pelo maior foguete já lançado: o Saturno V, com cerca de 100 metros de comprimento. Desenvolvido pela equipe de Von Braun, ele surgiu da necessidade de um veículo lançador poderoso o suficiente para lançar uma nave tripulada a Lua. Foi ele quem lançou a Apollo 11 em 1969, colocando os primeiros homens na Lua. No entanto, com o fim da Guerra Fria e da corrida espacial, o interesse em mandar homens à Lua caiu, não sendo mais necessário um foguete tão poderoso, e por isso o maior foguete já construído na história está aposentado.

## **A Atualidade**

Bem mais tarde, em 1981, chegaram os "Ônibus Espaciais", ou melhor, os STS (Sistema de Transporte Espacial). Eles surgiram da necessidade de veículos lançadores reutilizáveis, podendo assim economizar dinheiro nos lançamentos, já que não precisariam construir um novo foguete a cada lançamento. Apenas alguns tanques de combustível são inutilizados a cada lançamento. Apesar de surgir como uma boa idéia, os custos bem acima do previsto do projeto do STS tornaram ele uma dúvida. Então, em 1986, quando um deles (Challenger) explodiu matando seus sete tripulantes, a NASA decidiu repensar o projeto. Depois de cerca de três anos sem lançamentos e muitos testes, o Ônibus Espacial voou de novo, e está até hoje na ativa.



[foguete-e-satelites-fig-03.jpg](#)

[12.34 KB](#)

Lançamento do Columbia em 12 de Abril de 1981 - Missão STS-1.

Figura-3

Mesmo não sendo a alternativa mais barata em todos os casos de lançamento, ele foi responsável por colocar, continuamente e por cerca de vinte anos, americanos no espaço, dando experiência em vôos tripulados a eles. É o veículo americano utilizado para levar seus astronautas ao espaço, nas estações espaciais, por exemplo. Os russos usam ainda uma nave Soyuz, que deve ser lançada de um foguete.

Apenas americanos e russos tem tecnologia para colocar um homem no espaço, mas outros países também tem indústrias astronáuticas que merecem respeito. Talvez as mais relevantes sejam a francesa, com seus foguetes lançadores Ariane, responsáveis por muitos lançamentos comerciais atualmente, e a chinesa, com seus foguetes Longa Marcha. Os chineses também tem um projeto de colocar um homem em órbita, e estão trabalhando bastante nisso atualmente. O Brasil tem uma participação modesta no desenvolvimento do seu Veículo Lançador de Satélites (VLS) do Instituto de Aeronáutica e Espaço (IAE), do Centro Técnico Aeroespacial (CTA).

Atualmente, nós temos satélites de todo tipo orbitando a Terra, como o Telescópio Espacial Hubble, um telescópio colocado em órbita terrestre para evitar os efeitos da atmosfera sobre as imagens, gerando imagens muito mais nítidas.



[foguete-e-satelites-fig-04.jpg](#)

[12.15 KB](#)

Terceira imagem de uma série de quatro vista a partir do Ônibus Espacial Discovery momento antes de prendê-lo ao braço do sistema manipulador remoto as 18:03:40 GMT, Dec. 21, 1999.

Figura-4

Os foguetes e satélites tiveram inevitável importância no desenvolvimento da astronomia moderna (assim como em outras ciências), e sem dúvida continuarão a ter

por um longo tempo. Eles continuarão dominando o lançamento de objetos ao espaço por um tempo inimaginável, pois as novas tecnologias de propulsão em desenvolvimento se aplicam melhor a naves espaciais: objetos colocados no espaço pelos foguetes, para de lá seguirem seu caminho pelo espaço e em conjunto com os satélites, eles são poderosos instrumentos de observação espacial e terrestre, além de terem muitas outras aplicações, por sua localização privilegiada. Esses objetos estão entre as intenções mais espetaculares do século XX.

# Foguetes

O foguete era apenas uma curiosidade, mas, inesperadamente, a tecnologia moderna transformou-o em instrumento de guerra e de ciência.

Na arte dos foguetes o passo vital foi dado por Robert Goddard dos Estados Unidos e por uma equipe científica na Alemanha; separados por um oceano, eles desenvolveram desenhos de foguetes idênticos. O Goddard foi construído em 1941; a V 2 alemã efetuou o seu primeiro voo em 1942. A V 2 tinha 15 m de altura e quase o dobro do comprimento do outro foguete, transportava 8.500 kg de combustível e de oxigênio líquido (lox) contra os 115 do modelo de Goddard.

## **Foguete Goddard - Estados Unidos**

A entrada do combustível e do lox na câmara de combustão do foguete Goddard era forçada por bombas acionadas por turbinas. O maior empuxo registrado por este modelo foi de 435 kg, e a altura atingida, de apenas 100 m.

O lox era transportado atrás dos tanques de combustível do foguete. À medida que o veículo ia consumindo o propelente, os tanques se enchiam de nitrogênio; a pressão do gás ajudava a manter não só a rigidez da estrutura como também a circulação do combustível.

## **V-2 - Alemanha**

Um tubo conduzia o combustível para as bombas e para a câmara de combustão através do tanque de lox. Como acontecia no Goddard, o combustível era bombeado ao redor da câmara de combustão da V-2 para esfriar suas paredes.

A primeira V-2 foi abastecida com um combustível que era uma mistura de álcool etílico e água. A água reduzia um pouco a velocidade do foguete, mas sem ela a temperatura do motor teria sido elevada demais. Tal como no foguete Goddard, a orientação da V-2 era feita por giroscópios que punham em funcionamento as aletas móveis de escapamento.

## **Desenvolvendo Maiores Potências**

Quanto mais ambiciosa for a missão de um foguete, tanto mais eficaz deverá ser o seu gerador de força, o empuxo, que o eleva do solo e o coloca em órbita. A procura de combustíveis mais potentes levou à descoberta de muitos tipos deles. Existem atualmente 3 tipos principais..

1- Líquido comum, geralmente querosene que requer um oxidante, como o oxigênio líquido. 2- Sólido, uma combinação de nitroglicerina e nitrocelulose, com uma mesma fonte de oxigênio.

3- Líquido de alta potência, um combustível de hidrogênio líquido que é cerca de um terço mais potente que o querosene.

## Saturno V

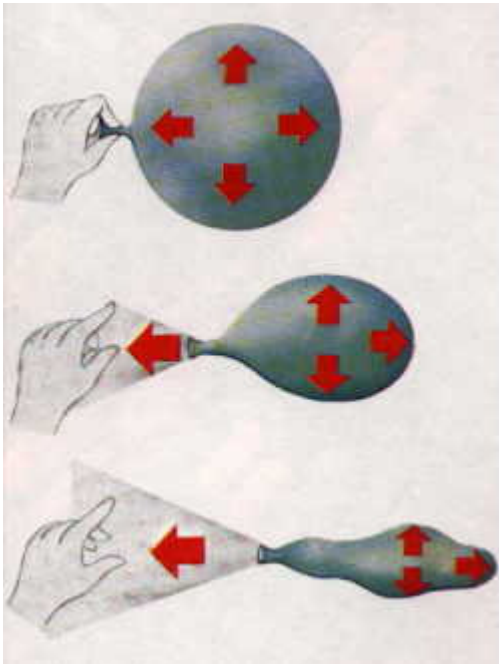
O grande foguete Saturno V foi projetado para levar à Lua os astronautas do Apoio. Tem 110 m de altura - mais alto que um edifício de 35 andares. No momento do arranque, pesa mais de 3.000 toneladas. Não bastando o avançado desenvolvimento do Saturno, os especialistas já estão tentando aperfeiçoá-lo. Uma das propostas consiste em substituir a primeira etapa a combustível líquido por grupos de motores a combustível sólido, aumentando a carga útil em 10%.

## Propulsor Recuperável

Um propulsor recuperável seria um que pudesse ser conduzido de volta à Terra completamente intacto depois de ter cumprido seu objetivo no espaço. Um conceito de tal magnitude é expresso pela nave "Siamese Twin" (Gêmeos Siameses). As duas naves decolam grudadas, depois, numa velocidade seis vezes maior que a do som, a primeira metade desprende-se para voltar à Terra, enquanto sua irmã gêmea começa a desenvolver velocidade para entrar em órbita. Posteriormente, a segunda metade regressará à Terra para uma aterrissagem em pista.

Ao suprimir as extravagantes despesas dos propulsores, veículos semelhantes a estes poderão trazer uma acentuada redução nos custos espaciais de até 95%.

## Foguetes



O foguete é um gênero de motor capaz de gerar maior potência em proporção ao seu tamanho do que qualquer outro tipo de motor conhecido. Um foguete pode produzir cerca de três mil vezes mais potência do que um motor de automóvel do mesmo tamanho.

Inventado pelos chineses no século XIII, mantém nestes longos 700 anos seus princípios iniciais, ou seja, expelle um vento quente em alta velocidade, causado pela queima de algum combustível. Mas ao contrário dos motores a hélice ou a jato, que empurram o avião para a frente e estes sustentam-se pela resistência do ar nas asas, o foguete não precisa de ar para planar. Ao contrário, no vácuo ele apresenta melhor rendimento, pois não há a resistência do ar.

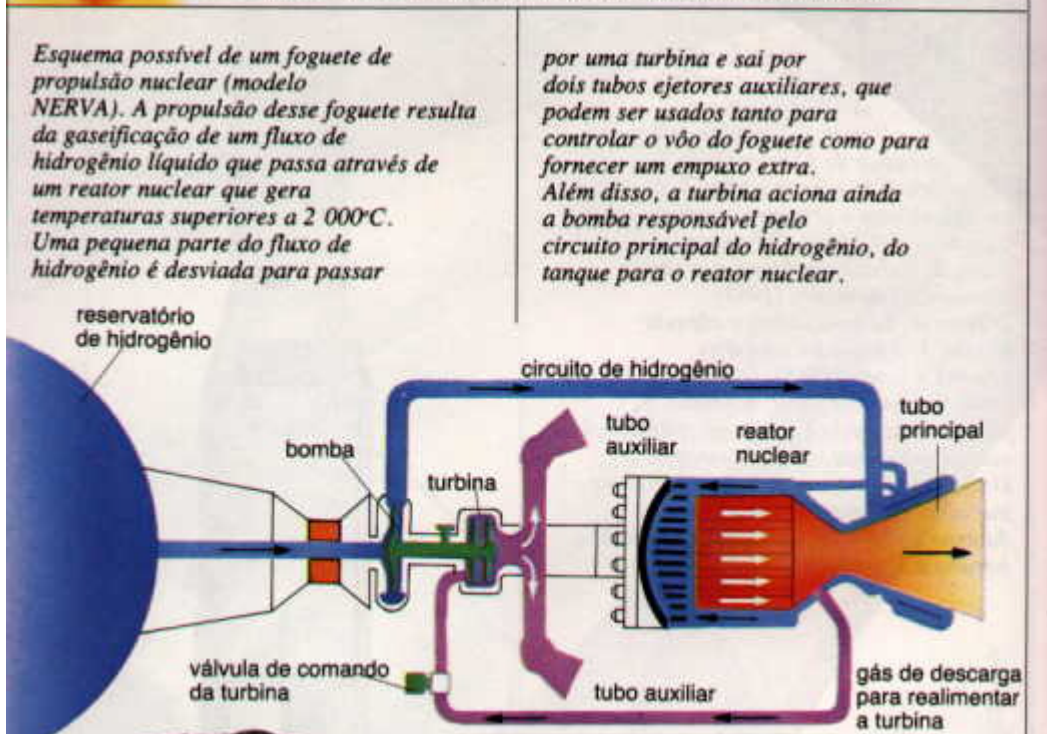
Para explicar o funcionamento de um foguete, o melhor exemplo é uma bexiga de ar, destas que enfeitam festinhas de crianças. Uma vez cheia, quando o ar é liberado, a bexiga projeta-se no sentido contrário ao da saída do ar. Mas não é este "jato" que impulsiona o objeto de borracha e sim uma força idêntica e no sentido contrário à saída, na parede oposta à boca. Portanto, este princípio funciona perfeitamente também no vácuo.

Lançar um foguete é como atirar uma pedra para longe. Após uma subida inicial, passada a força de impulsão, ela inicia uma trajetória de volta ao solo. Para que esta pedra possa cair fora da Terra e portanto ficar orbitando o Planeta, é necessário jogá-la a 28.800 km/h. Se quisermos que esta mesma pedra saia da atração gravitacional, então é preciso que ela seja arremessada a 40.000 km/h.

Em vista disso, embora simples na teoria, os “inventores” sempre tiveram pela frente um desafio: como fazer um foguete que vá mais alto, mais depressa e com mais carga. Para conseguir isso, quase que a totalidade do artefato era ocupada pelo combustível, pouco sobrando para a carga útil.

Além dos pioneiros chineses, no século seguinte os europeus começaram a interessar-se pelo artefato. Italianos, franceses e ingleses foram os que mais tentaram, porém com resultados modestos. Coube aos alemães os maiores progressos nesse campo. Em 1935 já lançavam foguetes de 50 kg a alturas de 2.500 metros. Mas foi com a bomba voadora V-2 que esta técnica alcançou o estágio de desenvolvimento até hoje não superado. Estes formidáveis foguetes pesavam 14 toneladas, tinham 15,5 metros de altura e alcançavam 80 km de altitude, levando uma carga útil de uma tonelada a 5.760 km/h, cujo motor tinha a potência de meio milhão de cavalos-força. Mesmo assim o motor media apenas 1,65 metros de comprimento e pesava perto de 450 kg. Sua potência era conseguida pela queima de uma mistura de álcool e oxigênio líquido.

Mas qualquer coisa que queime uniformemente pode ser usada como combustível: além do álcool etílico, também o querosene e a gasolina. A energia é conseguida através de uma combinação com outra substância, o oxidante, que provoca a combustão. E o mais popular deles é o oxigênio. Para motores atmosféricos (pistão, turbina ou vapor), este oxidante é obtido do próprio ar. Daí, mais um problema para os foguetes: no espaço não existe ar. Em vista disso, também o oxidante deve ser levado junto com o combustível. Mas o problema de armazenagem do oxidante foi resolvido, sendo levado em estado líquido, o que reduz sua área de armazenamento em até 60 vezes, desde que resfriado a 183° C abaixo de zero. Modernamente utiliza-se como combustível o hidrogênio (mais volumoso que o álcool, gasolina ou querosene) e como oxidante a fluorina e o tetróxido de nitrogênio.



Resolvida a questão do funcionamento, o desafio passou a ser como alcançar o espaço, levando carga útil. Dentro da equação até então em voga, estruturas monstruosas teriam de ser construídas, com chances duvidosas de sucesso, devido ao colossal tamanho. Isto porque, embora um foguete possa produzir grande potência, queima combustível muito rapidamente. O foguete Saturno V (110 metros de altura), por exemplo, queima mais de 1.210.000 litros de combustível durante os primeiros 2 min 45 s de vôo.

Mas a solução para este impasse já estava elaborada há 300 anos, nos manuscritos de um fabricante de fogos de artifício chamado Johann Schmidlap. Na sua concepção, seriam montados foguetes um no topo de outro. Era a idéia do foguete de fases ou de vários estágios. Nesse arranjo, cada foguete contribui com o seu impulso para ajudar o de cima. Quando acaba o combustível do primeiro, este solta-se e o segundo começa a funcionar já a partir de uma velocidade considerável e assim por diante, fazendo com que velocidades finais muito elevadas possam ser atingidas pelo último foguete da série.

Quando esta técnica foi posta em prática, estava definitivamente aberto o caminho para o espaço. Mesmo assim, um veículo de vários estágios pode pesar, no lançamento, mil vezes mais do que sua carga útil. Resta agora esperar pela nova geração de foguetes, esta sim revolucionária em relação a tudo o que foi feito até agora. Trata-se do foguete movido a fótons, que são feixes de ondas eletromagnéticas produzidas por um reator atômico. E o reator, como se sabe, necessita de muito pouco combustível para operar por dezenas de anos.

