



**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DO PIAUÍ
CAMPUS PICOS
LICENCIATURA EM ENSINO DE FÍSICA**

BRUNO RÊGO DE CARVALHO

FOGUETE DE GARRAFA PET: UM MOVIMENTO QUASE PARABÓLICO.

PICOS - PI

2018

BRUNO REGO DE CARVALHO

Foguete de garrafa pet: um movimento quase parabólico.

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado a Coordenação do Curso de Especialização em Ensino de Física do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Piauí, *Campus* Picos, como requisito para obtenção do grau de especialista em Ensino de Física.

Orientador: Prof. Dr. Ronaldo Campelo da Costa

BRUNO REGO DE CARVALHO

FOLHA DE APROVAÇÃO

Trabalho de Conclusão de Curso submetido à Coordenação do Curso de Especialização em Ensino de Física do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Piauí – IFPI, Campus Picos, como requisito para a obtenção do grau de Especialista em Ensino de Física.

Aprovado em: ____/____/____.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Ronaldo Campelo da Costa

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Piauí – Campus Picos

Prof. Dr. Haroldo Reis Alves de Macedo

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Piauí – Campus Picos

Prof. Ms. Pedro José Feitosa Alves Junior

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Piauí – Campus Picos

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho a minha família que sempre esteve presente nos momentos bons e difíceis que já passei na minha vida. Aos meus amigos, Joesley, Faustino e Pio por sempre me ajudar quando sempre precisei. E sempre a Deus pois sem ele a gente não é nada.

AGRADECIMENTOS

Ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Piauí – Campus Picos pelos conhecimentos transmitidos.

Agradeço a todos aqueles que, direta ou indiretamente, contribuíram para a elaboração deste trabalho e, de modo especial, ao professor Dr. Ronaldo Campelo da Costa, pelo incentivo constante e pela segura orientação.

*“Um homem pode morrer, lutar, falhar, até mesmo ser esquecido,
mas sua ideia pode mudar o mundo mesmo tendo se passado
400 anos.”*

V for Vendeta.

RESUMO

Este estudo nasce da problemática de retratar o movimento de um foguete de garrafa PET em sua trajetória real, ou seja, considerando fatores como resistência do ar. Diante desse problema, esse estudo tem como o objetivo geral mostrar o lançamento oblíquo de garrafas PET. Para isso, caracterizou alguns dos aspectos Físicos presentes no lançamento desses corpos como as Leis de Newton e conceitos de Empuxo, bem como a caracterização do combustível, contemplando desde a construção até o processo de voo. Assim, fornecer os conhecimentos necessários para a construção e utilização de um foguete de garrafa PET, tendo em vista que são descritos os passos e os materiais para a construção de um. Sendo uma pesquisa de revisão bibliográfica, os dados obtidos se deram através de leitura de textos que se correlacionavam com o tema, dentre os quais se obteve a descrição graficamente e as fórmulas de um lançamento oblíquo considerando a resistência do ar e comprovando a existência de uma reta assíntota vertical no lançamento oblíquo.

Palavras-chave: Foguete de Garrafa PET, Assíntota vertical e Leis de Newton.

ABSTRACT

This study arises from the problem of portraying the movement of a PET bottle rocket in its real trajectory that is, considering factors such as resistance. Faced with this problem, this study has as its general objective to show the obliquity of PET. For this, he characterized some of the Physical aspects present in the launch of these bodies as Newton's Laws and concepts of thrust, as well as the characterization of the fuel, contemplating from the construction to the flight process. Thus, provide the knowledge necessary for the construction and use of a PET bottle rocket, in view of which are described the steps and materials for the construction of one. As a bibliographical review research, the data obtained were obtained through the reading of texts that correlated with the theme, among which we obtained the graphic description and the formulas of an oblique launch considering the resistance of the air and proving the existence of a straight vertical asymptote at oblique pitch.

Keywords: PET Bottle Rocket, Vertical Asymptote and Newton's Laws..

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Escolas Participantes da MOBFOG, por ano.....	38
Gráfico 2 - Alunos Participantes da MOBFOG Por Ano.....	39
Gráfico 3 - Alunos Participantes da MOBFOG, por ano, do Piauí.....	40
Gráfico 4 - Escolas Participantes da MOBFOG, por ano, no Piauí.....	41

LISTA DE FIGURAS

Figura 01 - Modelo do bico do foguete.....	19
Figura 02 - Modelo da Saia do foguete	20
Figura 03 - Modelos das Aletas do Foguete.....	21
Figura 04 - O foguete Pronto.....	22
Figura 05 - pedaços dos canos com alguns pedaços encaixados	22
Figura 06 - Modelo da base seguindo os passos a, b, c e d	23
Figura 07 - modelo do tudo de lançamento.....	24
Figura 08 - Modelo do Gatilho	25
Figura 09 - Gatilho encaixa na base de lançamento do foguete	25
Figura 10 - Modelo do Processo de lançamento de um foguete de garrafa Pet.....	26
Figura 11 - Representação dos pontos de CM e CP	29
Figura 12 - Distância entre a CM e o CP para estabilidade.....	30
Figura 13 - Representação da ejeção do fluido.....	33
Figura 14 - Perfil da trajetória do foguete de garrafa PET.....	36
Figura 15 - Quadro de valores relativo da resistência do ar para diversos sólidos...	37

LISTA DE ABREVIATURA

CG	Centro de Gravidade
CP	Centro de Pressão
OBA	Olimpíada Brasileira de Astronomia e Astronáutica
MOBFOG	Mostra Brasileira de Foguetes

LISTA DE EQUAÇÕES

Equação 01 - Cálculo da Trajetória do Foguete.....	29
Equação 02 - Cálculo da direção da força aerodinâmica do foguete.....	29
Equação 03 - Cálculo para a propulsão aplicando a terceira Lei de Newton	32
Equação 04 - Cálculo desprezando a resistência do ar	33
Equação 05 - Cálculo para a variação da velocidade e o momento final	33
Equação 06 - Cálculo da velocidade de ejeção do fluido	33
Equação 07 - Cálculo da equação de velocidade do foguete	33
Equação 08 - Cálculo velocidade de escape de fluido relativo ao foguete.....	34
Equação 09 - Cálculo da equação de Bernouli.....	35
Equação 10 - Cálculo da taxa de fluido expelido	35
Equação 11 - Cálculo da velocidade de escape u	36
Equação 12 - Cálculo da pressão absoluta dentro do foguete	36
Equação 13 - Cálculo da razão do Peso sobre o Volume para líquidos.....	36
Equação 14 - Cálculo da pressão absoluta sobre a constante real dos gases.....	37
Equação 15 - Cálculo para velocidade do foguete no momento da saída	37

LISTA DE SIGLAS

F	Empuxo
Ve	Velocidade de ejeção de gases
Dm	variação da massa
Dt	variação do tempo
Pe	Pressão na saída do motor
Pa	Pressão ambiente
Ae	Área da secção transversal na saída do motor
Isp	Impulso específico
Ve	velocidade da ejeção de gases
Go	aceleração gravitacional
V	Velocidade do veículo
Mi	massa inicial do veículo
Mf	massa final do veículo
Ln	logaritmo natural
It	Impulso total
Tq	tempo de funcionamento do motor.
Cp	Centro de pressão
Cm	Centro de massa
mm	Milímetro
cm	Centímetro
g	Gramas
ml	Mililitro
m	Metro

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	15
2	REFERENCIAL TEORICO	18
2.1	A construção de um foguete de Garrafa PET	18
2.1.1	A Construção do Foguete de Garrafa PET, da Sua Base de Lançamento e Seu Tubo de Lançamento	18
2.2	Aspectos Físicos e Matemáticos do Lançamento do Foguete de Garrafa PET.	29
2.3	Dados da Mostra Brasileira de Foguetes	39
3	RESULTADOS E DISCUSSÕES	43
4	CONCLUSÃO	44
	REFERÊNCIAS	45
	APÊNDICE	47

1. INTRODUÇÃO

Nos últimos anos, vários estudos têm sido realizados com respeito aos lançamentos de foguetes com garrafas descartáveis tipo pet, a fim de popularizar essa prática e facilitar a sua construção, bem como melhor descrever o seu processo de voo matematicamente, neste caso que utiliza o foguete de garrafa Pet como estratégia do ensino de ciências (SOUZA, 2016).

Para Souza (2016), as aulas de ciências exatas são peças em seus aspectos teóricos-metodológicos devido ao ensino desenvolvido nas instituições básicas que dão prioridade a aulas expositivas sem explorar contextos extraclasse. Tendo em vista esse ponto, o presente estudo buscou um experimento de física, o foguete de garrafa pet, para trabalhar aspectos experimentais sem esquecer do lado pedagógico.

O estudo de foguetes de garrafas pet envolve a prática experimental que pode potencializar situações de ensino e aprendizagem e como destaque temos os trabalhos em astronáutica, cujos pioneiros nesses estudos foram Konstantin E. T., Robert H. G, e Hermann O. em 1857, que realizaram estudos com poucos recursos, mas que demonstraram a propulsão química de foguetes com potencialidade de levar carga ao espaço.

Bem diferente da época desses pesquisadores citados acima, hoje se dispõem de vários recursos para o estudo de experimentos amadores em astronáutica, que é o caso do foguete de garrafa pet dentre outros tipos de foguetes, ressaltamos aqueles carregam cargas úteis ao espaço. Esses foguetes que levam cargas importantes ao espaço, sejam elas astronautas, satélites, mantimentos e outros, fascinam estudantes e adultos. Analisar os aspectos referente ao ensino tanto de Física e quanto Matemática presentes no lançamento de foguetes de garrafa pet, é uma prática experimental que faz alusão ao real lançamento de foguete, possui então grande relevância para o ensino de física na educação básica.

A questão da relevância não é só por ser algo fascinante, mas também por tratar muito mais do que só a questão experimental, como também os aspectos lúdicos, visto que os alunos, para realizarem o lançamento desse projéteis, constroem seu próprio protótipo de acordo com as especificações do professor.

Para a construção desses protótipos de baixo custo, é necessário ter uma aerodinâmica adequada, saber distribuir a massa de forma correta e a devida separação entre centro de gravidade e o centro de pressão para fazer o foguete de garrafa pet, de fato, voar como um foguete, isto é, sem dar cambalhotas, sem vibrar e executando um perfeito movimento parabólico.

Além da parte estrutural, tem-se também o combustível, a maioria dos foguetes atuais funciona com combustíveis propulsores sólidos ou líquidos. O combustível é o produto químico que entra em combustão de dentro para fora do foguete e provoca a propulsão do mesmo.

Para um foguete de garrafa pet utiliza-se como combustível tanto o bicarbonato de sódio (NaHCO_3) reagindo com o vinagre (CH_3COOH) como ar comprimido colocado manualmente por uma bomba.

Para se construir um modelo que utiliza como combustível a reação do NaHCO_3 com o CH_3COOH , da qual é possível medir o alcance máximo desempenhado pelos protótipos, bem como melhor proporção de tal combustível para se obter um maior desempenho, isso tudo a mão de professores e um recurso para se ensinar física, química e fazer interdisciplinaridade.

A Olimpíada Brasileira de Astronomia (OBA) é uma das maiores incentivadoras do projeto Mostra Brasileira de Foguetes (MOBFOG) que abrange o número de 2.000 escolas participantes e 95.000 alunos. Isso mostra a importância e o porquê de existir a quantidade enorme de trabalhos que relacionam o lançamento de foguetes de garrafa pet.

A Mostra Brasileira de Foguetes é uma competição de foguetes de garrafa pet que envolve alunos e escolas de todo o país e, diante dos aspectos físicos mencionados, para a construção desses protótipos é necessário ter conhecimento a respeito das leis de Newton, da reação química que ocorre dentro do foguete e de conceito do movimento oblíquo.

Neste contexto da MOBFOG e com base na construção de foguete e seus lançamentos surge uma problemática, como retratar o movimento de um foguete de garrafa pet em sua trajetória real, ou seja, considerando fatores como resistência. Diante desse problema, esse estudo tem como o objetivo geral mostrar o lançamento

obliquo de garrafas pet e provar que ele não descreve o movimento completo em duas dimensões. E assim, responder perguntas como, “O alcance horizontal r é máximo para um ângulo de lançamento de 45° ” (HALLIDAY, 2009), com fatores como a resistência do ar influenciando no processo de voo.

Sendo assim, esse estudo tem por **Objetivo Geral** mostrar que o lançamento obliquo de garrafa pet não descreve o movimento completo em duas dimensões.

Para atingir esse fim, objetiva-se especificadamente:

1. Caracterizar alguns dos aspectos físicos presentes no lançamento de foguetes de garrafa pet.
2. Fornecer os conhecimentos necessários para a construção de um foguete de garrafa pet.
3. Demonstrar através de gráfico e equações a real trajetória do movimento de um foguete de garrafa pet sujeito a resistência do ar.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 A construção de um foguete de garrafa pet

“Um foguete é uma máquina que se desloca expelindo para atrás de si um fluxo de gás a alta velocidade” (FERREIRA, 1986, p.91), por consequência da ação das leis de Newton e do empuxo o foguete então consegue realizar uma trajetória quase parabólica. Por definição:

A palavra foguete aplica-se a um motor que provoca em um veículo evacuar gases de combustão ocasionados pela queima de reagentes, situada em sua parte traseira. Diferente de um motor a jato, por transportar seu próprio oxidante, que libera um suprimento de ar fazendo assim realizar a sua evacuação. (BARBOSA,2013)

De acordo com o apresentado a cima, o vocábulo foguete compreende toda uma variedade de combustíveis para propulsionar motores. Assim, percebe-se que esses combustíveis podem ou não ser elaborados bem como os respectivos veículos impulsionados. Já a sua origem, sabe-se que se deu em meio aos chineses:

Os documentos chineses registram o uso de "setas de fogo", um termo que tanto pode designar foguetes como uma seta com uma substância inflamável. No início do séc. XIII, a dinastia Sung chinesa, debaixo da pressão das crescentes hostes mongóis, viu-se forçada a depender cada vez mais da tecnologia para conter a ameaça. Os especialistas da artilharia chinesa introduziram e aperfeiçoaram muitos tipos de projéteis, incluindo granadas explosivas e canhões. As setas com foguetes foram decerto usadas para repelir os invasores mongóis na batalha de Kai-fung-fu em 1232 d.C. (NOGUEIRA, 2015)

2.1.1 a construção do foguete de garrafa pet, da sua base de lançamento e seu tubo de lançamento.

Os chineses foram quem inventaram os foguetes, mas hoje em dia existem várias formas de construírem avançadas ou apenas lúdicas e didáticas. De forma didática para se iniciar a construção de um foguete de garrafa pet é preciso se atentar

para as seguintes partes e lembrar de ter em mãos os seguintes acessórios que serão necessários para os passos adiante como tesoura, régua, detergente, fita micro porosa de 2,5 cm de largura, cola de pvc, corda de nylon de pequena espessura, chave de fenda, fita adesiva, funil, etc:

A ponta do foguete:

Para a produção do bico do foguete é preciso selecionar uma garrafa pet de 2 litros e cortar ela a 8,5 cm de sua boca, em seguida fixar, na parte inferior da garrafa. Este será o corpo do foguete.

Em cima da ponta da garrafa pet é fixado um bico pontiagudo feito com garrafa pet, com intenção de diminuir o impacto com o ar quando o foguete estiver voando. Nesse bico, deve ser colocado 50 g de cal, este envolvido por uma sacola.

É importante lembrar de cortar o excesso da sacola, “as alças”, isso logo após colocar a sacola dentro da ponta pontiaguda acima da ponta do bico. Os 50 g é a melhor medida que é encontrada para dar estabilidade ao foguete. (OBA, 2015).

Figura 1: modelo do bico do foguete



Fonte: Próprio autor

A “saia” do foguete:

Já para a produção da “saia” do foguete utiliza-se uma garrafa de parede reta cortando-a cerca de 8,5 cm, obtendo-se então um cilindro

Figura 2: Modelo da Saia do foguete

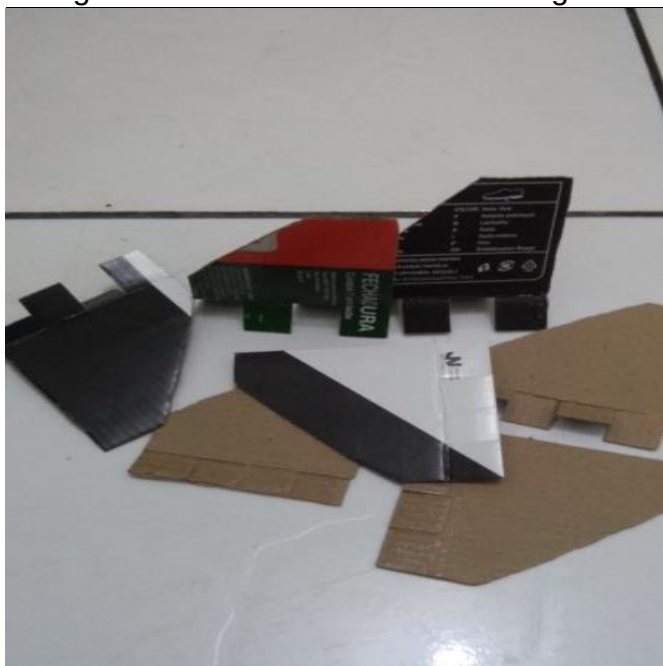


Fonte: Próprio autor

Aletas:

Para produzir as aletas do foguete de garrafa pet utiliza-se papelão, dele serão produzidos 4 aletas e estas presas externamente a saia do foguete.

Figura 3: Modelos das Aletas do Foguete



Fonte: Próprio autor

O foguete

Agora, para a construção do foguete em si, encaixa-se o bico (parte recortada da garrafa, boca + bico pontiagudo) no fundo da garrafa que faz a principal parte do foguete. É importante lembrar que a garrafa usada é diferente da usada na ponta, pois assim tem-se um encaixe melhor.

Um ponto importante para se conseguir mais segurança é usar cola de cano no local de encaixe para fixar o bico. O próximo passo é passar fita adesiva externamente no local da fixação.

Em seguida é acoplada a saia na parte onde fica a boca da garrafa, deixando-a um pouco acima da linha da boca para se ter um melhor manuseio das braçadeiras.

Figura 4: O foguete Pronto



Fonte: Próprio autor

A base de lançamento:

A base do foguete é construída com nove pedaços de canos de pvc marrons de 40 mm de diâmetro, sendo quatro pedaços de 20 cm, dois pedaços de 25 cm, dois pedaços de 10 cm e um pedaço de 15 cm. Junto a esses mais quatro joelhos de esgoto de 40 mm e três “T” de esgoto de 40 mm.

Figura 5: pedaços dos canos com alguns pedaços encaixados



Fonte: próprio autor

Os canos são conectados entre si usando os quatro joelhos e três “T”. A forma de conecta-los segue os seguintes passos que podem ser observados na figura 6:

- Os pedaços de 20 cm são conectados em dois “T”, cada um com um joelho na ponta.
- os canos de 25 cm são conectados nos joelhos.
- Já os pedaços de 10 cm são conectados com três “T”.
- O cano de 15 cm é colocado no “T” do meio e ajustado em uma inclinação de 45° em relação ao chão.

Figura 6: Modelo da base seguindo os passos a, b, c e d



Fonte: Próprio autor

e) passa-se cola na parte interna das conexões e nas pontas dos canos que entrarão nelas. Isso facilita a entrada dos canos nas conexões além de colá-las firmemente.

f) É importante preencher com cimento os canos utilizados e deixá-los secar durante dois dias, isso para evitar que a base não se movimente durante o lançamento e para que a pressão se distribua pelos canos e faça o foguete sair com mais velocidade.

O tubo de lançamento:

O tubo de lançamento é feito separadamente da base pelo fato de estar conectado com a válvula de lançamento. Ele é composto de uma luva de 40 mm, uma luva de redução de 40 mm para 20 mm, um “T” de 20 mm, junto a um joelho de 20 mm, um registro de 20 mm, cinco canos pvc marrom de 20 mm de diâmetro.

Três dos cinco canos de pvc são de 3 cm de comprimento e dois de 15 cm mais uma agulha de costura simples e um pouco de durepox. Os canos de 3 cm são utilizados meramente para conectar o “T”, o joelho, o registro e a luva de redução. Esse processo pode ser observado na figura 7:

Figura 7: modelo do tubo de lançamento



Fonte: Próprio autor

O gatilho:

Parte 1: Para que o foguete saia da base somente quando desejado, é necessário prendê-lo firmemente ao tubo de lançamento. Para isso usa-se oito abraçadeiras de nylon, com cabeças de **3,6 mm** colocadas simetricamente ao redor do tubo. A fixação das oito abraçadeiras de nylon é feita colocando uma abraçadeira de metal que abre até uma polegada. O fechamento da abraçadeira metálica é com a chave de fenda.

Parte 2: Os queixos das oito “cabeças” de nylon devem ficar encostadas no anel de sustentação. Porém isso ainda não prende o foguete, quanto pressurizado na base de lançamento. Tendo isso em vista, é preciso cortar um pedaço de cano branco de esgoto, de **40 mm** de diâmetro com **4 cm** de comprimento e fixar dois furos diametralmente opostos em suas extremidades.

Em seguida amarra-se ou prende-se uma corda de nylon de **13,5 cm** de comprimento entre estes furos e nela é amarrado outra corda com cerca de **5,80 m** de comprimento. Um exemplo do gatilho pronto esta apresentado na figura 8:

Figura 8: Modelo do Gatilho



Fonte: Próprio autor

Parte 3: Por fim, o anel branco é posicionado sobre as oito cabeças de nylon, as quais, por sua vez, estão tocando o anel de sustentação da boca da garrafa, isto é, do foguete. O gatilho já preso na base é representado na figura 9

Figura 9: Gatilho encaixado na base de lançamento do foguete



Fonte: próprio autor

Quando se percebe que o foguete chegou a pressão máxima, estica-se o barbante de **5,80 m** para trás do foguete e puxando-o com força suficiente para baixar o anel branco, liberando assim as oito “cabeças” das abraçadeiras de nylon. Neste instante o foguete sai violentamente da base de lançamento como é observado na figura 10.

Figura 10. Modelo do Processo de lançamento de um foguete de garrafa pet. Estudo realizado no IFPI Campus Picos, 2015.



Fonte: Próprio autor

A vedação da boca do foguete:

O diâmetro do tubo de lançamento do foguete é de 20 mm, ligeiramente menor do que o diâmetro interno do bocal do foguete. Este estará sobre alta pressão e não poderá haver vazamento de ar, por isso é usado o seguinte procedimento para a “folga” que existe entre o tubo e a boca do foguete.

A **10 cm** acima do registro, ao longo do cano de **15 cm** do tubo de lançamento, coloca-se um anel de um bico de balão de aniversário. Sobre este bico coloca-se ainda sete voltas de fita micro porosa impermeável com **2,5 cm** de largura, bem presa ao tubo. Por opção é possível usar detergente dentro da garrafa pet como lubrificante.

Medida de segurança:

Para poder lançar o foguete deve-se seguir algumas recomendações por medida de segurança como por exemplo, procurar lugares abertos, sem rede elétrica e sem trânsito de pessoas ou veículos para lançar o foguete.

Combustível do foguete:

Existem vários tipos de combustíveis porém o mais comum é o vinagre e o bicarbonato de sódio. O modo de preparo envolve utilizar um vinagre com 4% de concentração de ácido etílico e depois misturado, quando for montar o foguete, ao bicarbonato de sódio. A melhor proporção é de **200 g** de bicarbonato de sódio para **750 ml** de vinagre, (OBA, 2015).

Carregamento do foguete com combustível:

Coloca-se o balão dentro do foguete e em seguida aperta a garrafa, juntando suas paredes. Com o auxílio de um funil coloca-se cerca de **750 ml** de vinagre. À tendência que o vinagre encha o balão. Após estar cheia o balão de vinagre amarra-se a boca e é soltado dentro da garrafa.

Limpa-se o funil e utiliza-se para colocar cerca de 250 gramas de bicarbonato de sódio dentro da garrafa. Em seguida Levanta-se e Inclina a base para baixo até se encaixar o “tubo de lançamento” da base do foguete, atentando para o balão não

descer antes do tempo de estourar na agulha presa fixa na ponta do tubo de lançamento com cola DUREPOXI. Mantendo o foguete e a base na horizontal, prendemos o gatilho no foguete.

Lançando o foguete:

Agora o foguete estando devidamente fixado na base, levanta-se ele e coloca-se a base no solo, já que está cheia de cimento não necessita a fixação dela com ferros ou com pedras para que ela fique bem firme ao chão.

Nesse momento a reação já é para estar acontecendo, então aguarda-se cerca de 40 segundos, e já com a corda do gatilho basta puxa-la por alguns centímetros. Feito isso o foguete deve sair com uma grande velocidade da base lançando o combustível para trás e indo para frente, podendo chegar a cerca de 170 metros ou mais.

2.2 Aspectos Físicos e Matemáticos do Lançamento de Foguete de Garrafa PET

Depois de aprender como é construído e lançado um foguete de garrafa PET, o estudo agora observa a sua trajetória, quando lançado. E o primeiro ponto a se atentar é o que influencia diretamente na sua estabilidade, o Centro de Massa(CM) e o Centro de Pressão(CP). Para isso utiliza-se as seguintes equações, (SOUZA, 2007).

$$Y_{CM} = \frac{\sum_i Y_i m_i}{\sum_i m_i} \quad \text{Eq. 1}$$

Em que y_i = É o tamanho da ordenada ou da altura do CM

$\sum_i m_i$ = Massa Total do Sistema

m_i = Massa de cada parte do foguete

Porém também é preciso encontrar o Centro de Pressão (CP), pois ele dá a direção da força aerodinâmica no sistema, ou seja, a localização desse ponto é que vai determinar se vai seguir uma trajetória estável ou errante.

$$Y_{CP} = \frac{\sum_i Y_i A_i}{\sum_i A_i} \quad \text{Eq. 2}$$

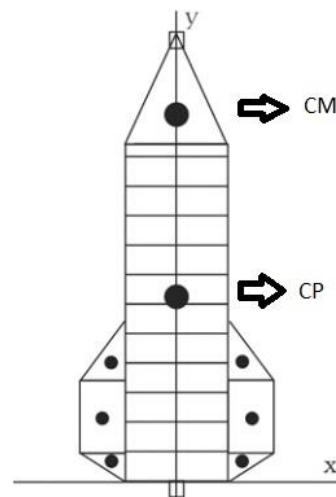
Em que y_i = Coordenado do centro de elemento de Área retangular ou triangular

$\sum_i A_i$ = Soma das áreas dos elementos formados pelas partes do foguete

A_i = Área correspondente

Esses pontos podem ser observados na figura a seguir:

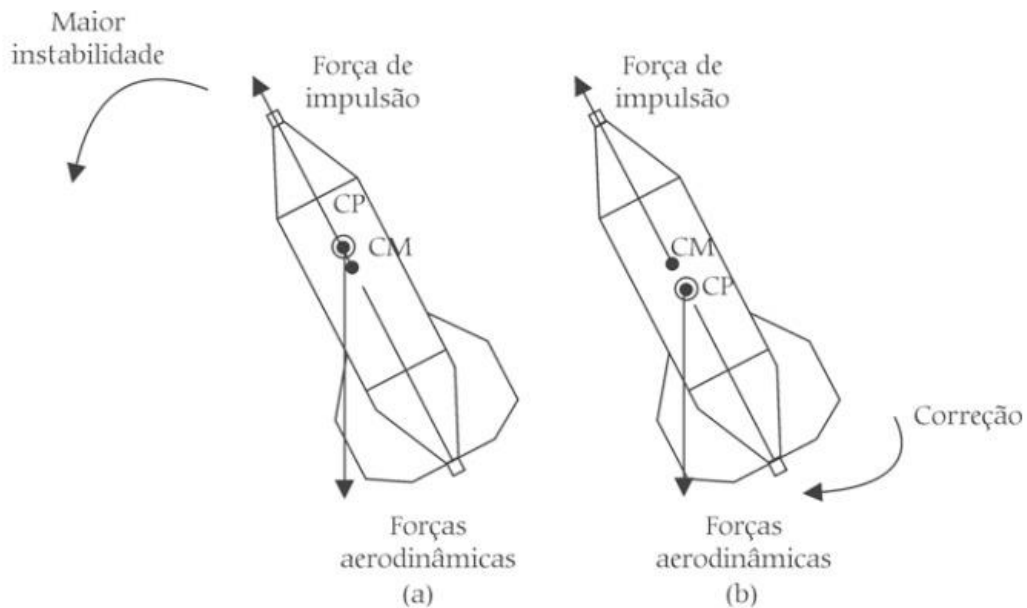
Figura 10. Representação dos pontos de CM e CP



Fonte: SOUZA, J. A. (2007)

De acordo com as equações 1, 2 e conforme as medidas de (WIDMARK 1998), uma boa estabilidade se consegue para um CM 1,5 cm acima do CP. Essa distância é a medida que proporciona a correção da trajetória do foguete por meio do CP, caso esse saia do seu eixo de voo. Se esse valor for maior, a trajetória será alterada e o projétil não subirá da forma correta, o foguete pode ficar oscilando como se tivesse “rebolando no ar”. Isso pode ser examinado na figura 12:

Figura 11. Distância entre a CM e o CP para estabilidade



Fonte: SOUZA, J. A. (2007)

Agora que se conhece a estabilidade do foguete perante sua trajetória, interessa-se em sua propulsão. É sabido que a propulsão do foguete é dada pelas Leis de Newton e pelo Empuxo.

A Primeira Lei de Newton, lei da inércia, “um corpo em repouso permanece em repouso a não ser que uma força externa atue sobre ele” (TIPLER, 2006), Isto é, a inércia é a inclinação que o objeto tem a opor-se a mudança de movimento. Isso está ligado com a massa do corpo em questão.

Então, uma garrafa que tem uma maior quantidade de líquido, terá maior massa e consequentemente maior resistência a alteração do movimento, ou seja, é preciso uma corrente de vento maior para mudar a trajetória do foguete. Sendo a garrafa preenchida com uma quantidade menor de fluido ocorre o processo inverso.

A afirmação anterior pode ser comprovada apenas analisando o enunciado da segunda Lei de Newton, “aceleração de um corpo é diretamente proporcional a força que atua sobre ele, e o inverso da massa do corpo é a constante de proporcionalidade”, (TIPLER, 2006).

Porém, é lógico que para uma maior quantidade de massa é preciso de uma maior quantidade de força para provocar a aceleração e quanto maior a força, maior

a reação, como exposto na terceira Lei de Newton, a qual anuncia que, “quando dois corpos interagem entre si, a força $\vec{F}_{ba}$ exercida pelo corpo B sobre o corpo A tem a mesma magnitude e o sentido oposto da força $\vec{F}_{ab}$ exercida pelo corpo A sobre o corpo B” (TIPLER, 2006).

O foguete em questão tem propulsão gerada pela ejeção de fluido em seu interior, entende-se então, pela terceira Lei de Newton, que quanto mais fluido for expelido para fora ou quão mais rápido isso acontecer, maior será a reação do foguete. E pela conservação da quantidade de movimento essa reação ocasiona o impulsionamento do foguete.

O segundo ponto a ser abordado referente a propulsão do foguete de PET é o Empuxo, que no livro (HALLIDAY, 2009), é definida como uma força direcionada para cima e tem um modulo igual ao peso do fluido deslocado pelo corpo.

Em resumo, o fluido expulso para fora da garrafa causa uma reação de sentido oposto a direção do corpo, por isso depende tanto da velocidade com que o fluido é expelido do seu interior ou da largura do orifício por onde o fluido será ejetado.

Depois de entender os princípios da estabilidade agora o estudo se voltara para a propulsão, aplicando então a terceira Lei de Newton

$$\sum F = \frac{\Delta p}{\Delta t} \quad \text{Eq. 3}$$

Em que Δp = variação do momento

Δt = tempo de voo

Para esse estudo é considerado desprezível a resistência do ar e que há apenas uma única força agindo sobre o corpo, a força gravitacional. Desse modo, sendo o momento dado por:

$$p = Mv \quad \text{Eq. 4}$$

Em que M = massa inicial (massa do foguete + massa do fluido em seu interior)

V = velocidade de ejeção do fluido

E com a alteração da velocidade de ejeção do foguete de v para Δv por conta da variação da velocidade, o momento final P_f é dado por:

$$P_f = (M - \Delta m_l) \cdot (v + \Delta v) - \Delta m_l v_f \quad \text{Eq. 5}$$

Em que teremos o acréscimo de Δm_l massa do fluido do interior do foguete e v_f velocidade de ejeção do fluido.

Agora utilizando-se das equações 3 e 5 temos e considerando a força de reação como peso:

$$-M_g = \frac{(M - \Delta m_l) \cdot (v + \Delta v) - \Delta m_l v_f - Mv}{\Delta t} \quad \text{Eq. 6}$$

Depois de algumas manipulações matemáticas e considerando o $\Delta m_l v_f \ll \Delta m_l$ encontra-se a equação de velocidade do foguete Δv , (SOUZA, 2007):

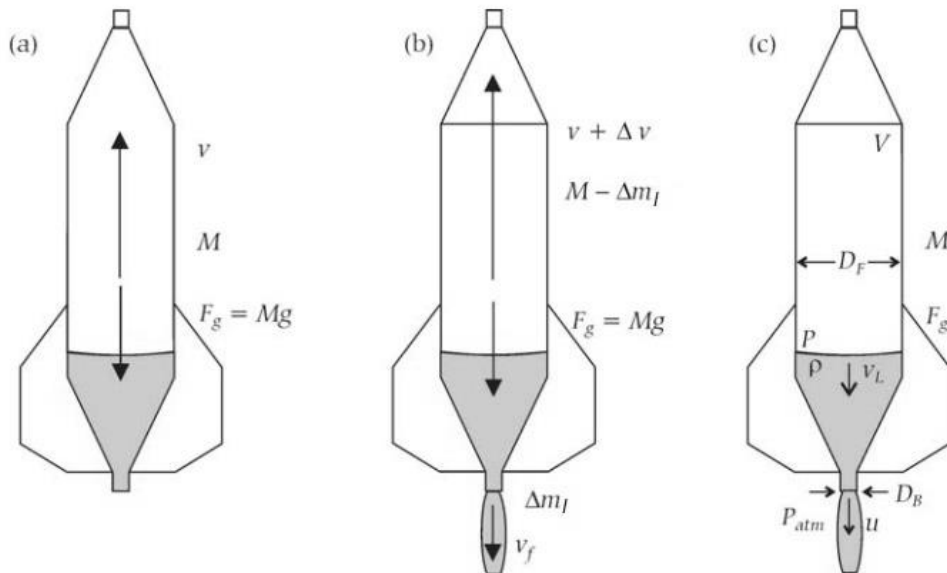
$$\Delta v = -g\Delta t + \frac{\Delta m_l v_f}{M} u$$

Sendo $u = v + v_f$, representando a velocidade de escape de fluido relativo ao foguete e utilizando as quantidades $\Delta m_l = \rho \Delta v$ e $M = \rho V_l + m_f$, em que ρ é a densidade do fluido e Δv a mudança no volume do fluido dentro do foguete, enquanto V_l volume do fluido dentro do foguete e m_f massa do foguete vazio. Chegasse então a equação 8:

$$\Delta v = -g\Delta t + \left(\frac{\rho \Delta v}{\rho V_l + m_f} \right) u \quad \text{Eq. 8}$$

É possível ainda calcular a velocidade do foguete durante o tempo de lançar os fluidos para fora do corpo do foguete e é conhecido como velocidade de escape u do foguete representado pela figura 13:

Figura 12. Representação da ejeção do fluido com base na velocidade de escape do ar de dentro do foguete.



Fonte: SOUZA, J. A. (2007)

Na figura 13 estão representados os três momentos por qual passa o foguete, (a) onde não há ejeção do fluido e a única força atuante é a gravidade, (b) representa a ejeção de uma pequena quantidade de fluido de massa Δm_l , velocidade v_f , massa variável $(M - \Delta m_l)$ e mudança de velocidade $v + \Delta v$. (c) mostra o volume v de fluido dentro do foguete, a pressão sobre a superfície do fluido p , o diâmetro do foguete, D_F ; diâmetro do orifício, D_B ; a densidade do fluido, ρ ; a velocidade dentro do foguete, V_i ; velocidade de escape, u ; e a pressão atmosférica P_{atm} .

Depois de ter observado a representação das principais partes do processo de ejeção de fluido no interior do foguete, figura 13, tomamos agora, para fins de cálculo,

o fluido em seu interior como perfeito, incompressível, de escoamento estacionário e aplicamos a equação de Bernouli a fim de descobrir a velocidade de escape u , (YOUNG, 2003)

$$\frac{1}{2} \rho V_c^2 + P = \frac{1}{2} \rho u^2 + P_{atm} \quad \text{Eq. 9}$$

Sendo o tubo cilíndrico o termo $\rho g y$ é perdido. Os demais termos da equação, como os do lado esquerdo da igualdade apontam a quantidade de fluido no interior do foguete, ou seja, a velocidade V_c e a pressão em sua superfície P . no lado direito estão os termos relacionados a quantidade de fluido ejetado do foguete, a qual tomada como velocidade relativa u e a P_{atm} .

É possível perceber que u e V_c estão associados com a taxa de fluido expelido e que é equivalente com a taxa do volume de líquido V dentro do foguete. Esta associação pode ser equacionada da seguinte forma, (SOUZA, 2007).

$$\frac{\Delta V}{\Delta t} = \frac{1}{4} u \pi D_B^2 = \frac{1}{4} V_L \pi D_F^2 \quad \text{Eq. 10}$$

Em que D_B = representa o diâmetro do orifício

D_F = diâmetro do corpo do foguete

Vale lembrar que as medidas representadas nas equações (9) e (10) estão expressas na figura (3 c) e que $V_c \propto D_B/D_F$ com uma razão $\ll 1$, de forma a ficar ainda menor quando elevado a potência na equação (9), desse modo perde-se o primeiro termo da equação (9) e chegamos depois de algumas manipulações a seguinte equação, que nos dá a velocidade de escape u :

$$u = \sqrt{2 \left(\frac{P - P_{atm}}{\rho} \right)} \quad \text{Eq. 11}$$

Outro ponto interessante a se observar acontece se considerarmos o processo que ocorre dentro do foguete como sendo adiabático, pelo fato de ocorrer muito rápido e não considerar trocas de calor com o meio externo. Com Δt muito pequeno podemos crer que o gás é ideal, com isso, (SOUZA, 2007).

$$P = P_0 \left(\frac{V_0}{V} \right)^\gamma \quad \text{Eq. 12}$$

Em que P_0 = representa pressão absoluta inicial dentro do foguete

V_0 = volume inicial dentro do foguete

V = volume final

γ = peso específico do fluido (N/m^3) que pode ser calculado pela razão do Peso sobre o Volume para líquidos e de pressão absoluta sobre a constante real dos gases vezes a temperatura.

Depois de algumas manipulações substituindo a equação (12) na (11) chega-se há:

$$u = u_c \sqrt{\left(\frac{V_0}{V} \right)^\gamma - \frac{P_{atm}}{P_0}} \quad \text{Eq. 13}$$

Em que u_c é a velocidade característica dada por:

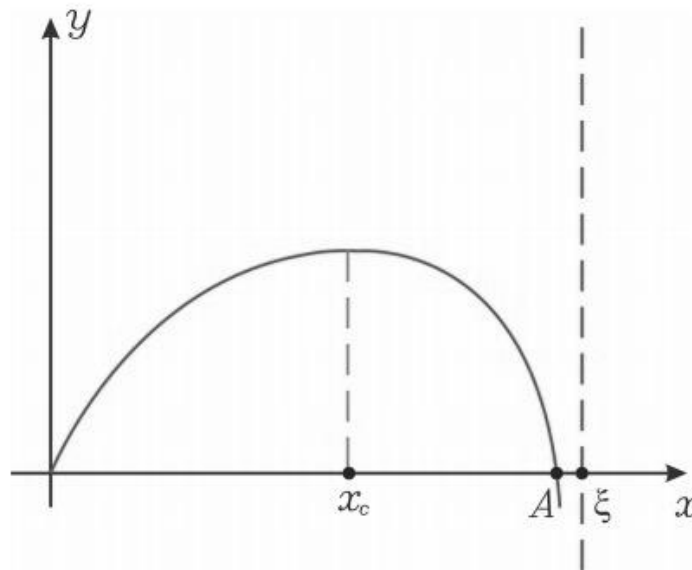
$$u_c = \sqrt{\frac{2P_0}{\rho}} \quad \text{Eq.14}$$

Assim utilizando as equações (13), (7) chegamos a velocidade do foguete no momento em que todo o fluido é expelido para fora:

$$\Delta v = -g\Delta t + u_c \left[\left(\frac{\rho \Delta V}{\rho V_l + m_F} \right) \cdot \sqrt{\left(\frac{V_0}{V} \right)^\gamma} - \frac{P_{atm}}{P_0} \right] \quad \text{Eq. 15}$$

Depois de encontrar a velocidade de quando todo o fluido é expelido para fora do foguete, recordamos que quando ele atinge sua velocidade máxima, inicia o processo de queda livre. Isso pode ser observado na figura 14:

Figura 13: Perfil da trajetória do foguete de garrafa PET



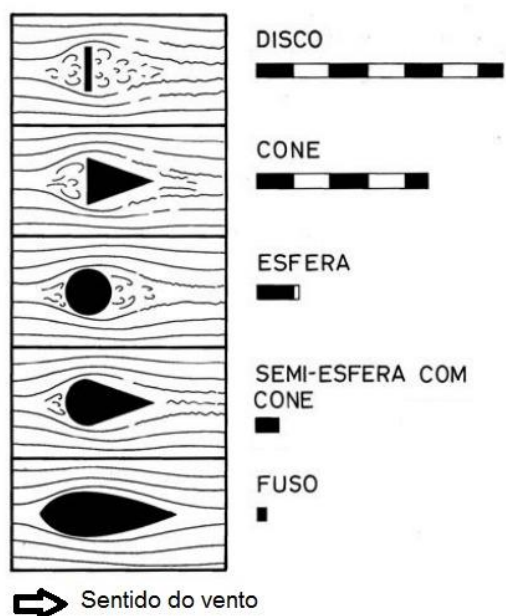
FERREIRA, W. H. C. et al 2016

Na figura 14 observamos que por causa da força da gravidade e da resistência do ar teremos uma assíntota vertical, ou seja, uma reta que limita o final da curva. A linha tracejada, que limita a coordenada x no intervalo $0 < x < \xi$, é usada como referência para essa assíntota vertical. E a letra A representa o alcance do foguete.

A assíntota vertical, que caracteriza o movimento e uma trajetória quase 2D ocorre por conta da aerodinâmica do foguete. O nome dado a grandeza física que representa a resistência do ar a aerodinâmica do corpo é chamada de coeficiente de

arrasto e depende da área frontal e da distribuição da pressão, essa última, varia com a forma e a velocidade. Isso pode ser percebido na figura a seguir:

Figura 14: Quadro de valores relativo da resistência do ar para diversos sólidos de mesmo diâmetro



Fonte: Rodrigues J. C. 1964

A figura 15 representa as superfícies planas de comprimentos pequenos e as superfícies curvas mais alongadas. A linha tracejada ao lado dos quadros mostra a intensidade da resistência do ar. O foguete de garrafa pet mais se aproxima do fusso, porém mesmo sendo o que oferece menor resistência ao ar, é possível notar a resistência do ar. Esse efeito junto a gravidade provoca a assíntota vertical.

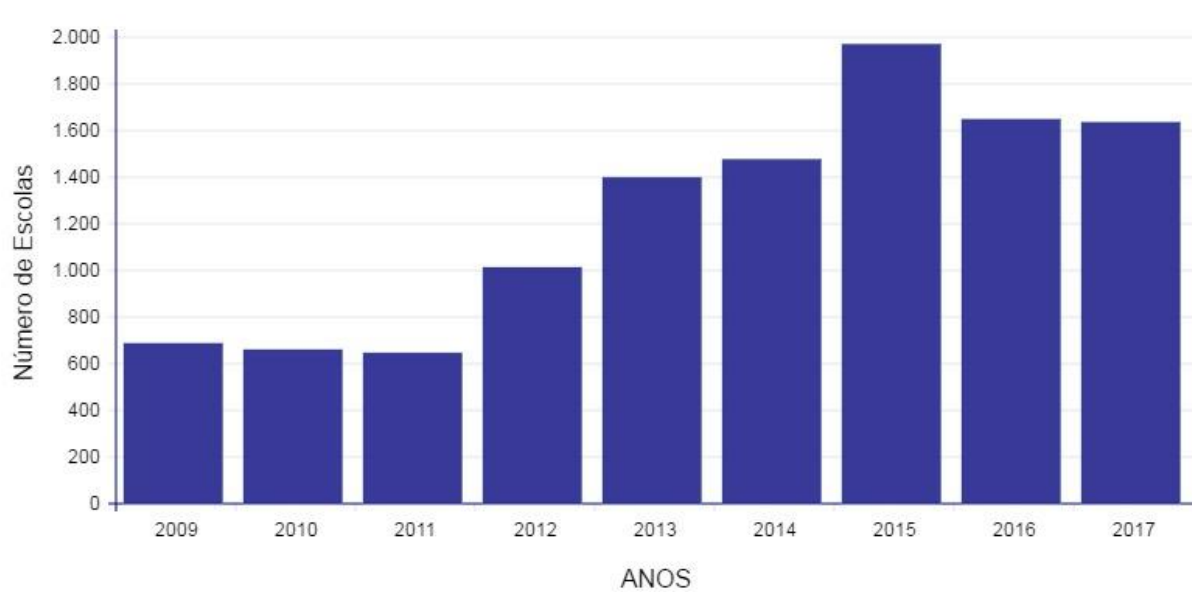
2.3 Dados da Mostra Brasileira de Foguetes

Depois de quantizar alguns processos físicos agora será tratado a importância do lançamento de foguete de garrafa pet, para isso analisaremos os dados da Olimpíadas Brasileira de Astronomia e Astronáutica(OBA) mais especificadamente a Mostra Brasileira de Foguetes (MOBFOG), que é “um evento aberto à participação de escolas públicas ou privadas, urbanas ou rurais, previamente cadastradas”. (OBA, 2015).

A MOBFOG certifica e premia os alunos (Anexo 1 e 2) com medalhas e troféus. Nela estão envolvidos milhares de alunos de todos os estados do Brasil, como será

mostrado nos Gráficos a seguir obtidos das escolas públicas e privadas que participam:

Gráfico 1: Escolas Participantes da MOBFOG, por ano:

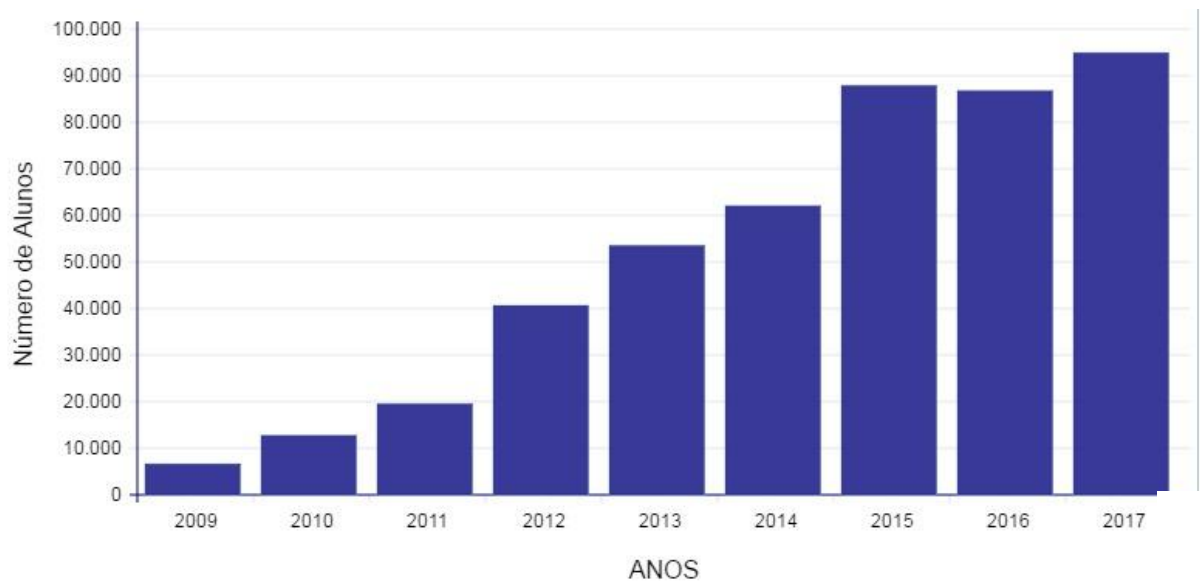


Fonte: OBA, 2017.

Como pode ser visto no Gráfico 1, que houve um aumento no número de escolas participantes de 2009, época que se iniciou o projeto MOBFOG, até 2015, época de maior número de escolas participantes, chegando a cerca de quase 2000 instituições e participantes.

Observa-se também que nos anos de 2016 e 2017 houve uma diminuição do número de unidades escolares participantes, por motivos não esclarecidos pela OBA, porém é de se impressionar com a quantidade de colégios envolvidos.

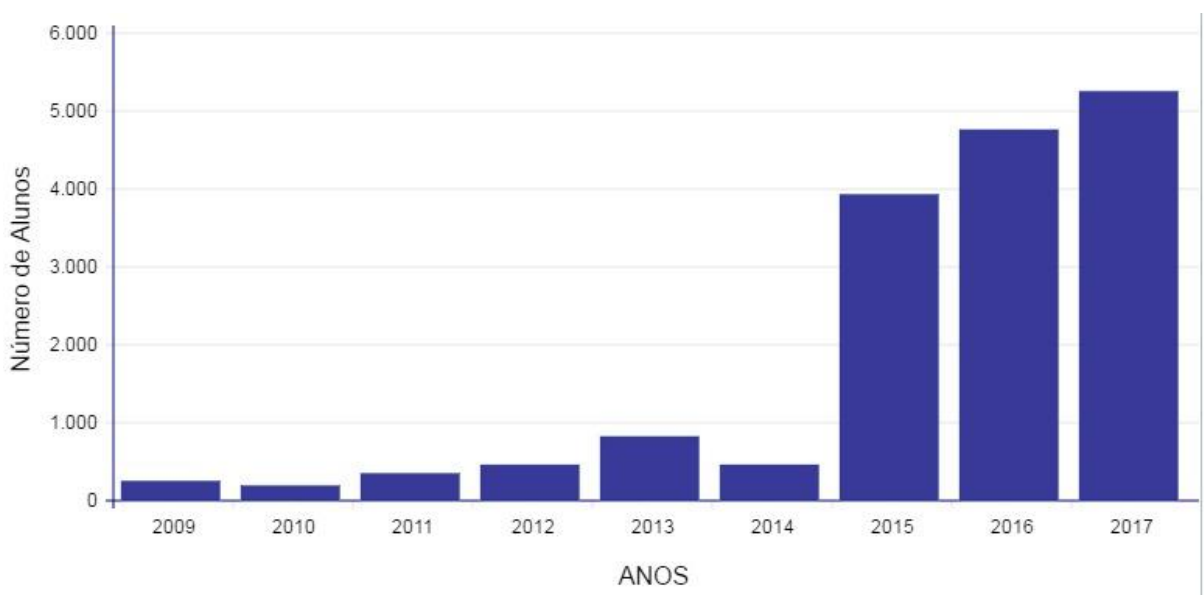
Gráfico 2: Alunos Participantes da MOBFOG Por Ano:



Fonte: OBA, 2017.

Já no gráfico 2, percebe-se o aumento graduado do número de alunos participantes da MOBFOG chegando a cerca de mais de 90.000 alunos participantes, isso nos revela a importância da prática do lançamento dos foguetes de garrafas PET e a relevância dos estudos como esse que procuram proporcionar meios de aprimorar e investigar lançamentos desses projetos.

Gráfico 3: Alunos Participantes da MOBFOG, por ano, do Piauí.



Fonte: OBA, 2017

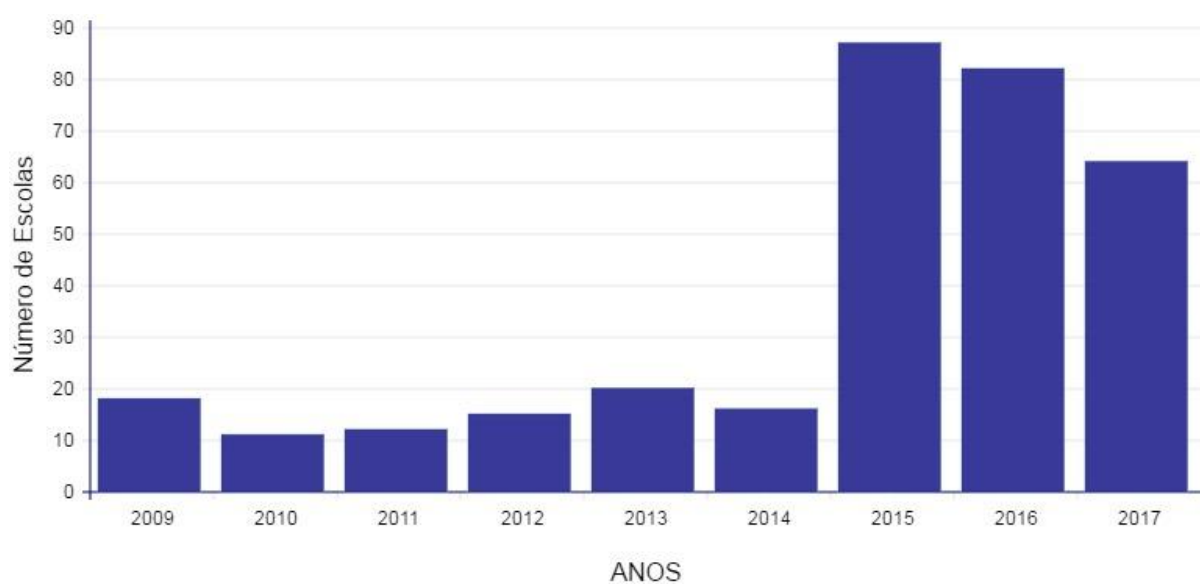
No gráfico 3 encontramos de forma mais específica a participação do Piauí na MOBFOG, o qual nos revela que apenas 5,5% do total de alunos participantes são do Piauí.

É certo que quanto maior o número de habitantes no estado mais provável será o número de alunos participantes, mas se dividirmos o total de estudantes participantes por 27, o número de estados do Brasil, nota-se que os 5,5% não chegam nem a média do número de alunos inscritos por estado.

Outro ponto importante a se destacar no gráfico 3 é o empenho dos organizadores da MOBFOG nos 3 últimos anos, o qual mostra um grande salto crescente na participação dos estudantes.

Porém algo estranho acontece quanto ao número de escolas participantes do Piauí. Com o número de alunos aumentando, o esperado seria que o número de escolas também tivesse aumentado ou estabilizado, contudo o que se vê é o número de escolas diminuir 3 últimos anos, gráfico 4:

Gráfico 4: Escolas Participantes da MOBFOG, por ano, no PI



Fonte: OBA, 2017

3. RESULTADOS E DISCUSÕES

Agora que já foram feitas as principais considerações sobre alguns dos processos físicos a respeito do voo de um foguete de garrafa pet, bem como seu princípio básico de funcionamento, serão discutidos nesta sessão os principais resultados obtidos nesse estudo, dentre eles o mostrado no gráfico 4.

O resultado da figura 14 representa o principal alvo deste estudo, o movimento do foguete de garrafa pet em uma quase parábola, isso se deve a vários fatores, como já foi discutido na sessão 2.2, por isso quando se tratar do lançamento de foguete de garrafa pet a melhor descrição física compreende ao movimento oblíquo com uma assíntota vertical.

Apesar de, na maioria dos casos pesquisados, a abordagem do lançamento ser oblíquo sem resistência do ar, é importante tratar de forma fiel ao movimento, para aproximar os cálculos do que se é ensinado nos livros. Porém é compreensível aplicar casos ideais devido a complexibilidade dos cálculos envolvidos.

Mesmo diante da complexibilidade, caso tratado em casos não ideais, o lançamento de foguete de garrafa Pet mostra-se de grande importância para se trabalhar a interdisciplinaridade entre várias disciplinas, pois como é visto nos gráficos que contabiliza o número de escolas e alunos participantes abrange uma enorme quantidade de pessoas.

4. CONCLUSÃO

Como foi possível observar, baseado em gráficos e lançamentos realizados por estudantes na MOBFOG, o movimento oblíquo de um foguete de garrafa pet, considerando o atrito do ar, como é ilustrado e retratado em casos ideais pelos estudados da MOBFOG.

É evidente que isso ocorre pela necessidade de tornar mais fácil e compreensível o conteúdo pelos alunos do ensino médio. Porém, abordar de forma real o problema pode levar os dados medidos para mais próximo do experimental real e evitar a divergência quanto a obtenção de dados, como por exemplo ao medir a distância que o foguete de garrafa pet pode alcançar.

Constatou-se também a importância da MOBFOG com o meio de ensinar conceitos físicos teóricos ligando as práticas experimentais, baseado nos gráficos utilizados que representavam o envolvimento de alunos e escola na Mostra Brasileira de Foguetes de Garrafa pet, pois observou-se o aumento no número de escolas e alunos nos últimos anos. Mas o que mais impressiona não é o aumento, mas sim a quantidade de participantes que chega a mais de 2.000 escolas e 95.000 mil alunos participantes.

REFERÊNCIA

BARBOSA, J. O. MENDES, E. V. C. PINHEIRO, G. A. MARCÍLIO, D. C. Foguete de Garrafa Pet. Disponível em: <http://jornada.cba.ifmt.edu.br/jornada/index.php/jornada2013/jornada2013/paper/viewFile/66/37>. Acessado: 27/10/2017

FERREIRA, A. B. H. Novo Dicionário da Língua Portuguesa. 2ª edição. Rio de Janeiro. Nova Fronteira. 1986. p. 91.

HALLIDAY, RESNICK, WALKER. **Fundamentos de Física**. Vol. 2. 8 ed. Editora LTC, 2009

NOGUEIRA, J. L. Revista de Gestão e Tecnologia. In **Estudo da viabilidade do uso de celulignina como combustível de propulsores híbridos**. v. 3, n. 2 . 2015. Disponível <http://www.revista.unisal.br/lo/index.php/reget/article/view/202>. Acessado: 27/05/ 2016

OLIMPIADA BRASILEIRA DE ASTRONAUTICA E ASTRONOMIA (OBA). Construção do foguete publicado em 2015, disponível em: <http://www.oba.org.br/site/?p=conteudo&pag=conteudo&idconteudo=647&idcat=29&subcat=>

SOUZA, J. A. **Um foguete de garrafas pet**. Artigo. Departamento de Física, Universidade de São Carlos, São Carlos, São Paulo, SP, Brasil, 2007. Disponível em: <http://www.sbfisica.org.br/fne/Vol8/Num2/v08n02a02.pdf> Acessado: 22/09/2017

SOUZA, P. V. T.; AMAURO, N. Q. A Construção de Foguetes como Estratégia Didática no Ensino de Ciências. In: V CONGRESSO IBERO-AMERICANO EM INVESTIGAÇÃO QUALITATIVA/1ST INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON QUALITATIVE RESEARCH, 1, 2016, Porto/Portugal. Anais... Porto: Universidade Lusófona do Porto, 2016. p. 940-947.

TIPLER, P. A.; MOSCA, G. **Física para cientistas e engenheiros** – Vol.1 . 5.ed. Rio de Janeiro: LTC, 2006

WIDMARK ,S. A. **The Physics Teacher** 36, 148 (1998). <https://doi.org/10.1119/1.879987>

.

YOUNG, H. D.; FREEDMAN, R. A., **FÍSICA III**, 10a ed. São Paulo, Addison Wesley, 2003;

ANEXOS

Anexo 1 - Modelo dos certificados distribuídos a todos os alunos, professores colaboradores, diretores e escolas participantes da VII MOBFOG.



Fonte: Olimpíada Brasileira de Astronauta e Astronomia.

Anexo 2 – Exemplos dos três tipos de medalhas distribuídas para 4.842 alunos.



Fonte: Olimpíada Brasileira de Astronauta e Astronomia.