

DESENVOLVIMENTO E CALIBRAÇÃO DE BALANÇA EXTENSOMÉTRICA PARA MEDIR EMPUXO DE FOGUETE DIDÁTICO

EL DROUBI, Ashraf, a_droubi@hotmail.com¹
ARAUJO, Thiago Rocha, thiago.rocha.araujo@usp.br¹
BAKKENIST, Hendrik, hendrik_hba2@hotmail.com¹
GRECO, Paulo Celso, pgreco@sc.usp.br¹
IZOLA, Dawson Tadeu, dawson@sc.usp.br¹
MONTEIRO, Fernanda do Nascimento, nanda_nm@yahoo.com.br¹

¹Escola de Engenharia de São Carlos – EESC – USP, Av. Trabalhador São Carlense, 400, Centro, São Carlos – SP
CEP: 13566-590

Resumo: *A balança consiste em um equipamento para ensaio de empuxo estático de foguetes didáticos de pequeno porte, movidos à água e ar comprimido. Através de uma célula de carga, é medida a força de empuxo do foguete durante a ejeção de água. Um módulo supervisor para aquisição de dados e um amplificador de sinais são acoplados ao equipamento medidor e então os dados obtidos podem ser analisados. O Equipamento medidor de empuxo é formado por um tripé com três hastes de 1,7 metros cada. A célula de carga é fixada na base inferior da mesa de junção das hastes, onde é fixado o motor foguete na posição vertical em um ponto central da célula de carga. Durante o funcionamento, o motor a jato exerce forças em vários sentidos e com módulos diferentes. Para minimizar o problema do movimento gerado pelas forças e também do atrito causado entre partes móveis, optou-se por um sistema fixo de célula de carga única. A calibração foi realizada utilizando-se de Pesos Padrão em uma escala representativa do funcionamento do foguete. Os dados obtidos através do medidor de empuxo podem ser utilizados para o estudo aplicado em engenharia, motivando a compreensão da Física e da Matemática envolvidas neste tipo de sistema. Com o ensaio estático se determina o alcance e a velocidade do foguete, através do tempo de funcionamento do motor, Força de Empuxo e Força Resultante.*

Palavras-chave: *Balança Extensométrica; Foguete Didático; Ensino de Engenharia*

1. INTRODUÇÃO

Foguetes fascinam a humanidade há mais de 2.000 anos e com o tempo surgiram inúmeras aplicações para eles: pirotecnia, uso militar, coleta de dados atmosféricos e como veículos lançadores de satélites e de naves espaciais.

Os pequenos foguetes seguem às mesmas Leis Físicas que foguetes maiores, Fig. (1) e (2) mesmo utilizando-se de muitas simplificações matemáticas, as quais, além de visar a didática, apresentam erro tolerável quando comparado com resultados experimentais.

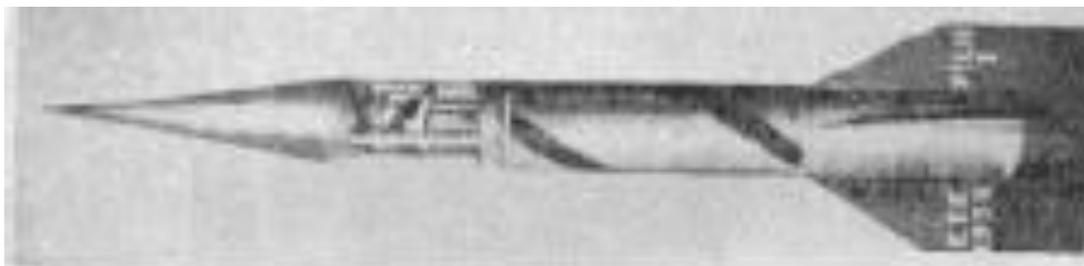


Figura 1. Foguete Félix 1. (1958) – Exército Brasileiro. Alcance 120 km. Carga útil 30 kg.

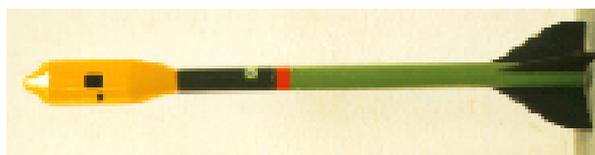


Figura 2. Foguete para foto aérea (1994) – Fatec - SP. Alcance 2 km. Carga útil 0,5 kg.

O estudo desses pequenos foguetes desperta no aluno o interesse em compreender, na prática, os problemas físico-matemáticos. Os resultados práticos são satisfatórios e a teoria é aplicada ativamente no processo.

A abordagem é simplificada mesmo que o equipamento utilizado seja sofisticado e que alternativas mais elaboradas sejam possíveis. A construção da balança, inclusive, é bem simples. As Leis de Newton são a base para o equacionamento das situações.

A abordagem simplificada no primeiro instante deve-se ao grau de envolvimento do aluno com as ciências exatas no início de um curso de graduação. Esta atividade, entretanto, se desenvolveu com mais profundidade em atividades extracurriculares; podendo, inclusive, ser parte de um projeto de conclusão de curso.

Núcleos para atividades educativas espaciais foram criados na década de 1960, motivados pelo governo Norte Americano e pela Corrida Espacial. Muitos dos jovens que participaram desta atividade, atualmente, fazem parte do programa espacial americano.

O objetivo deste trabalho é aplicar as equações de Newton, Torricelli e Bernoulli a um motor de foguete construído com garrafa PET e impulsionado com água pressurizada. Utilizando as equações simplificadas, calcula-se o valor teórico do empuxo e, posteriormente, com os dados obtidos em uma balança extensométrica, faz-se a comparação.

2. METODOLOGIA EXPERIMENTAL

Para esta fase, o equipamento foi montado em um tripé. Nele foram colocados a balança (cuja célula de carga foi fixada na junção dos pés), uma haste (para conectar a célula de carga ao alojamento da garrafa PET) e uma mesa (fixada por três tirantes). A mesa apoia a garrafa ao tripé e anula a força peso do conjunto, fazendo com que a medida seja das forças de empuxo do foguete.

2.1 O Equipamento



Figura 3. Balança, célula de carga e detalhes do motor.

Uma garrafa PET de dois litros constitui o motor. O volume de água foi variado de 20 a 40% do volume da garrafa e a pressão interna de 300 kPa a 600 kPa durante o estudo; a água foi adicionada manualmente e a pressão, acompanhada pelo manômetro, foi introduzida com uma bomba de ar. Com o sistema carregado, abre-se o engate rápido, registrando o empuxo por intermédio de um sistema de aquisição de dados.

2.2 Sistema de Aquisição

Foi utilizada uma célula de carga LBM com uma ponte completa de extensômetros para medir a força de empuxo do foguete. O sinal dos quatro conectores de saída foi amplificado por um sistema MGCplus de ganho $k=100$ antes de ir

para a placa de aquisição NI-daq USB-6009 que, usando um Vi (programa no Labview), registrou o sinal amplificado de empuxo do foguete, em Volts.



Figura 4. Célula de carga LBM.

Tabela 1. Características da célula de carga.

Faixa de saída:	2 mV/V nominal
Faixa de compensação de temperatura:	60° to 160°F
Faixa de leitura de temperatura:	-65° to 200°F
Resistência do terminal:	350 ohms nominal
Voltagem de excitação:	10 VDC

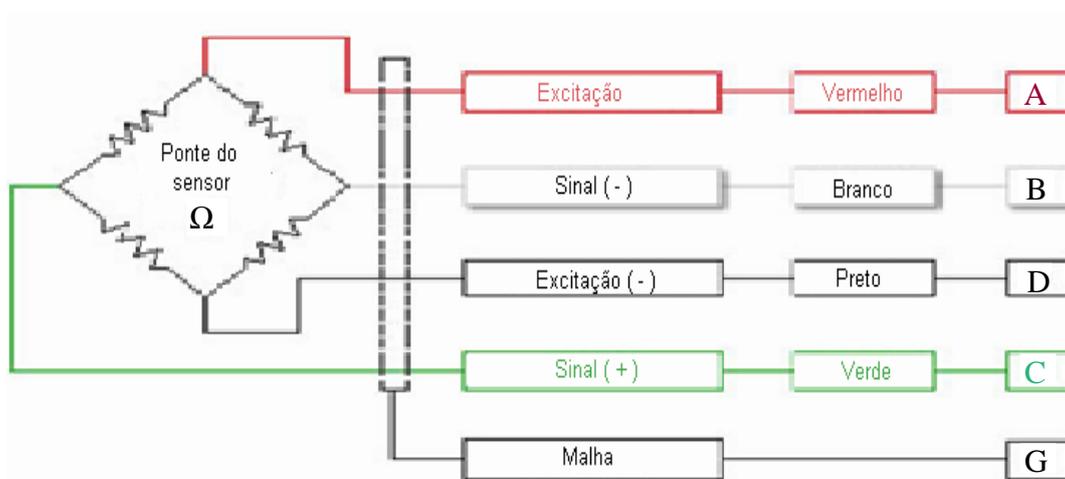


Figura 5. Célula de carga LBM, circuito e conexões.

2.3 Calibração da Balança

Massas de referências previamente medidas foram usadas na calibração; cada uma foi relacionada a sua saída em mV.

A balança foi fixada em posição invertida e as massas apoiadas sobre o alojamento da garrafa, sendo a massa do alojamento o zero de referência. Com os dados, utilizou-se uma regressão linear para estabelecer a função que relaciona a força de entrada com a saída em mV.

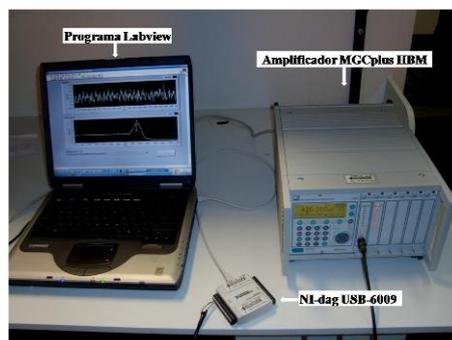


Figura 6. Sistema de aquisição.

Tabela 2. Relação entre a carga e a saída em mV.

g	kg	kg acumulado	mV
---	----	--------------	----

38,1	0,04	0,04	2
499,8	0,5	0,54	49
499,2	0,5	1,04	99
508	0,51	1,55	155
504,9	0,5	2,05	214
1000,13	1	3,05	322
998,4	1	4,05	426
998,4	1	5,05	542
998,4	1	6,05	650
998,4	1	7,04	755
1994	1,99	9,04	923
1992	1,99	11,03	1080

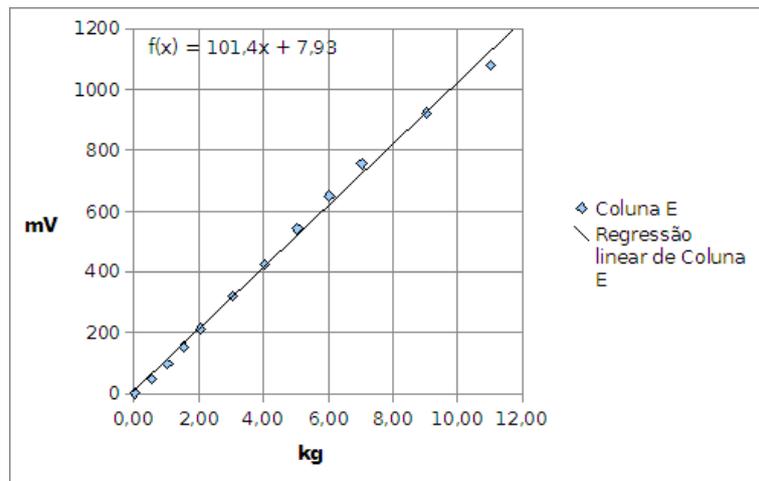


Figura 7. Relação entre kg e mV.

2.4 Programa de Interface no Labview

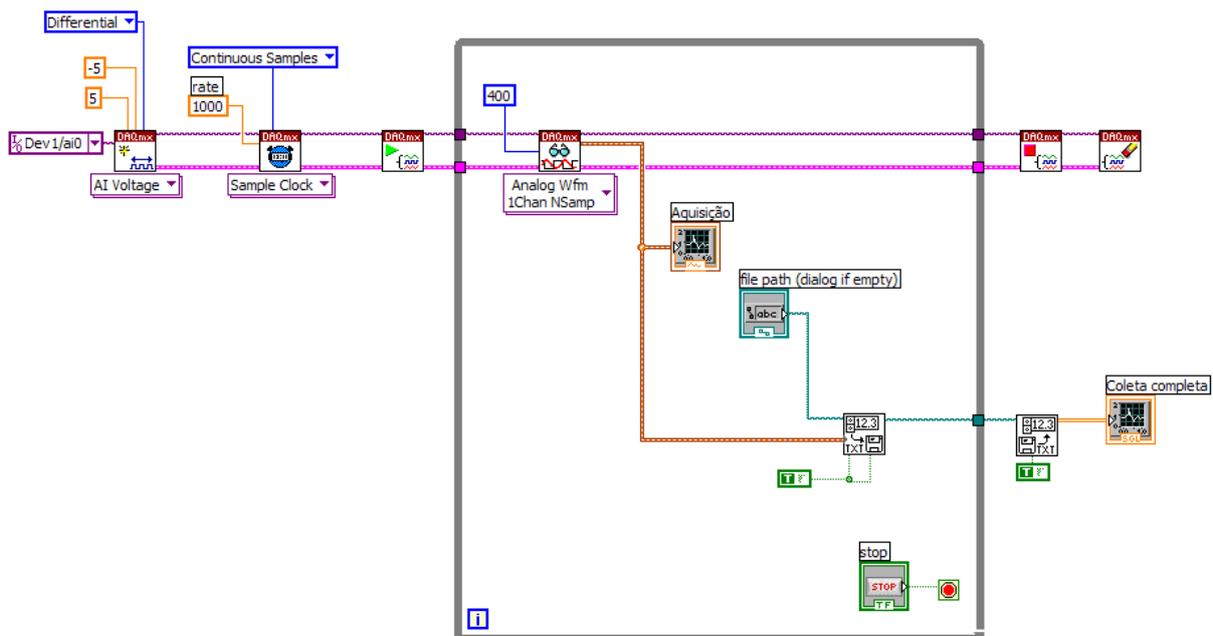


Figura 8. Diagrama de blocos do Labview

3. RESULTADOS

O experimento foi realizado em várias configurações de pressão (medida em atm) e de quantidade de água. Seguem os ensaios:

Tabela 3. Dados dos ensaios

n	Pressão (atm)	Porcentagem do volume da garrafa em água (%)	Volume de água	Empuxo Máximo (kgf)	Figura
1	3 atm	20%	400 ml	1,6 kgf	9
2	4 atm	20%	400 ml	4 kgf	10
3	5 atm	20%	400 ml	3,5 kgf	11
4	5 atm	30%	600 ml	3,4 kgf	12
5	5 atm	40%	800 ml	4 kgf	13
6	6 atm	40%	800 ml	6,2 kgf	14
7	6 atm	30%	600 ml	5,1 kgf	15

Os resultados a seguir são as medidas de empuxo do foguete encontradas com o uso do *Labview*.

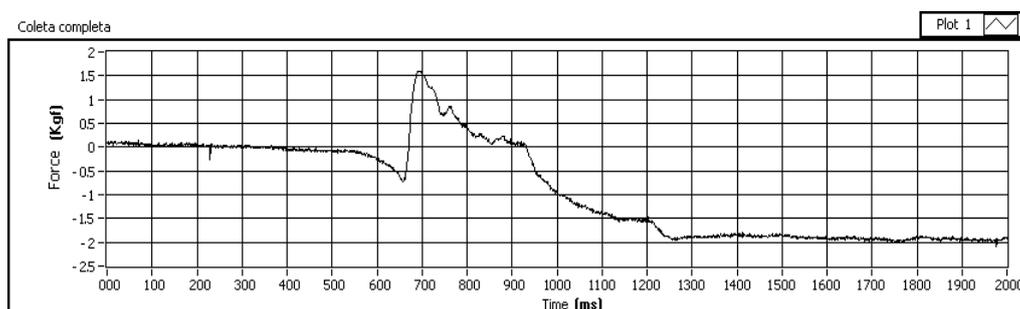


Figura 9. Empuxo com 3 atm, 20% de água (400ml).

O gráfico da Fig. (9) mostra um valor máximo de 1.6 kgf de empuxo, correspondente a um máximo valor 0.16 V.

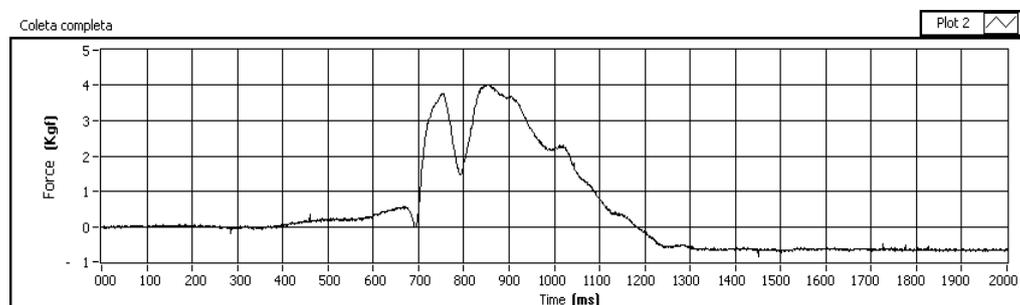


Figura 10. Empuxo com 4 atm, 20% de água (400ml).

O gráfico da Fig. (10) mostra um valor máximo de 4 kgf de empuxo, correspondente a um máximo valor de 0.4 V.

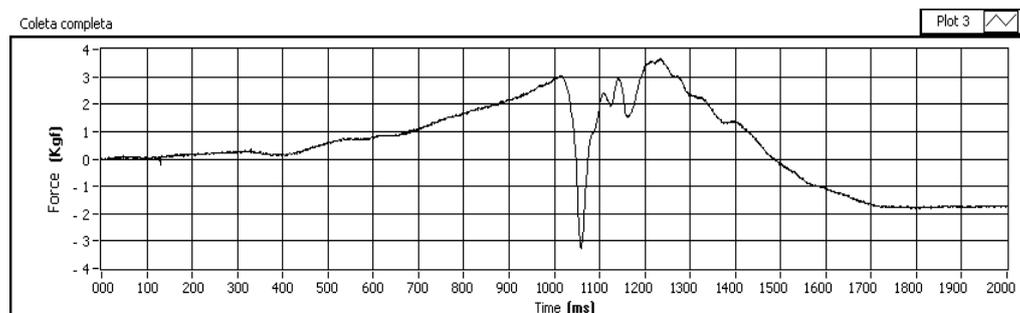


Figura 11. Empuxo com 5 atm, 20% de água (400ml).

V. O gráfico da Fig. (11) mostra um valor máximo de 3.5 kgf de empuxo, correspondente a um máximo valor de 0.35 V.

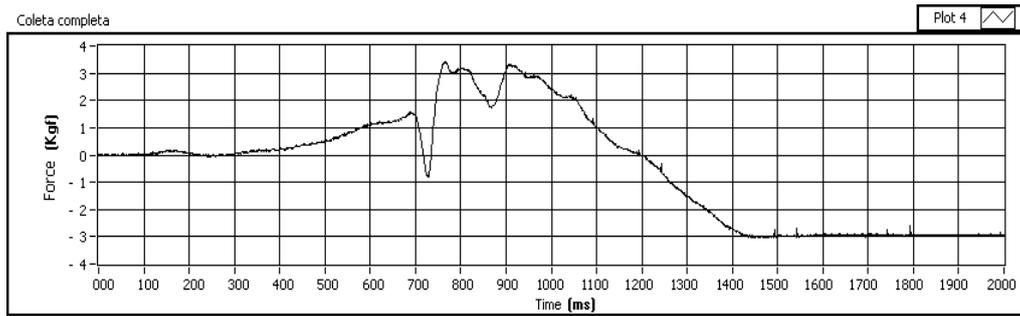


Figura 12. Empuxo com 5 atm, 30% de água (600ml).

V. O gráfico da Fig. (12) mostra um valor máximo de empuxo de 3.4 kgf, correspondente a um máximo valor de 0.34 V.

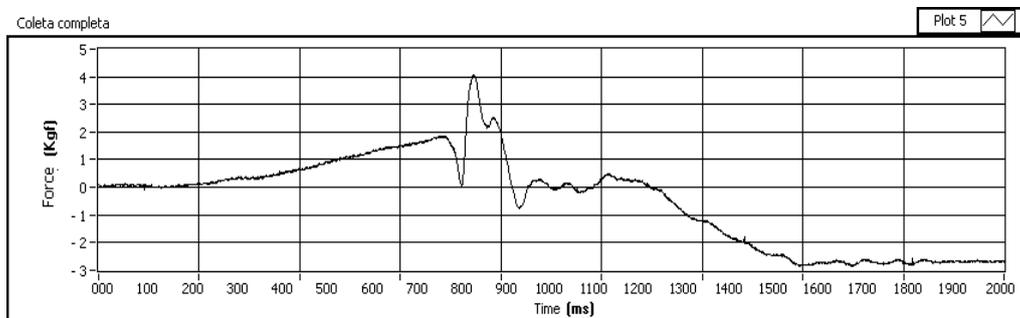


Figura 13. Empuxo com 5 atm, 40% de água (800 ml).

O gráfico da Fig. (13) mostra um valor máximo de 4 kgf de empuxo, correspondente a um máximo valor de 0.40 V.

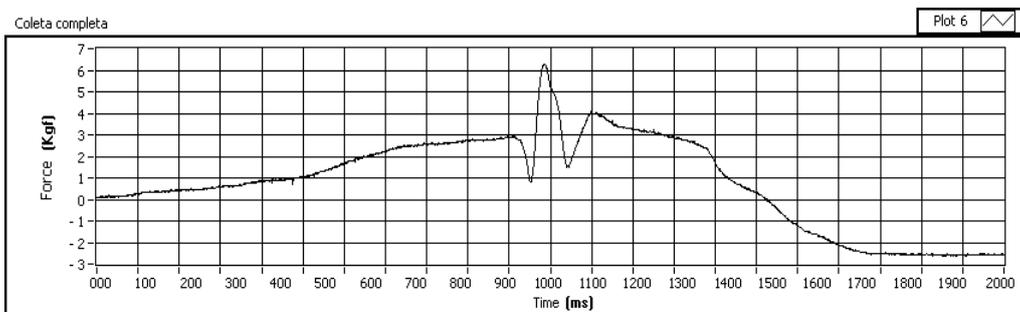


Figura 14. Empuxo com 6 atm, 40% de água (800 ml).

V. O gráfico da Fig. (14) mostra um valor máximo de 6.2 kgf de empuxo, correspondente a um máximo valor de 0.62 V.

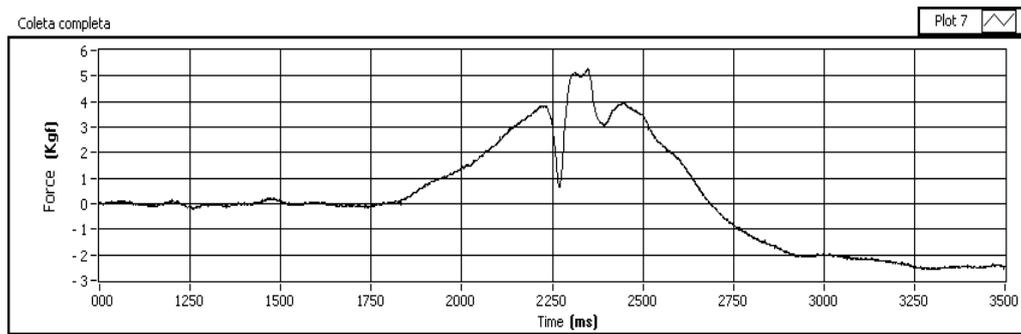


Figura 15. Empuxo com 6 atm, 30% de água (600 ml).

O gráfico da Fig. (15) mostra um valor máximo de 5.1 kgf de empuxo, correspondente a um máximo valor de 0.51 V.

4. COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS EXPERIMENTAIS COM A TEORIA

Dados do motor-foguete:

- Volume interno = 2 litros = 0,02 m³;
- Diâmetro interno da garrafa = 100 mm = 0,1 m;
- Diâmetro da saída = 8,52 mm = 0,00852 m;
- Pressão interna relativa = 200.000 a 500.000 Pa.
- Volume de água = 20 a 40% do volume da garrafa.

O escoamento de água através do orifício de saída da garrafa provoca uma força de reação, o empuxo, cuja mecânica é a mesma que envolve a propulsão a jato. Com algumas considerações, a equação de Bernoulli passa a ser aplicável e tornasse possível o cálculo dessa força sob o sistema garrafa, água e ar pressurizado.

Se A_2 é a área do orifício de saída, ρ é a densidade do fluido que está sendo expelido e v_2 é a velocidade de ejeção (descarga), a massa do fluido expelido no tempo dt será $\rho \cdot A_2 \cdot v_2 \cdot dt$ e seu momentum linear (massa x velocidade) será $\rho \cdot A_2 \cdot (v_2)^2 \cdot dt$. Como a velocidade no ponto 1 é muito menor do que no ponto 2 (ejeção), pode-se dizer que o fluido inicia o escoamento partindo do repouso, adquirindo o momento acima no tempo dt .

A taxa de variação de momento será, conseqüentemente, $\rho \cdot A_2 \cdot (v_2)$ que, pela Segunda Lei de Newton, é igual à Força de propulsão atuante. Pela Terceira Lei de Newton, uma Força de Reação igual e de sentido contrário atua no restante do sistema.

Usando a expressão do Teorema de Torricelli, tem-se:

$$v_2^2 = \sqrt{\frac{2(P - Pa)}{\rho}} \quad (1)$$

Onde:

- P é a pressão interna da garrafa;
- Pa é a pressão atmosférica.

A Força de reação pode ser escrita como:

$$F = \rho \cdot A_2^2 \cdot v_2^2 = \rho \cdot \frac{A_2^2 \cdot 2(P - Pa)}{\rho} \quad (2)$$

Simplificando:

$$F = 2 \cdot A_2^2 \cdot (P - Pa) \quad (3)$$

Enquanto a velocidade de descarga é inversamente proporcional à densidade, o empuxo independe da massa, sendo função apenas da área de saída e da pressão manométrica ($P - Pa$). Neste estudo a Pressão Interna Absoluta variou de 200.000 a 500.000 Pa e a Pressão Atmosférica adotada como 100.000 Pa.

4.1 Calculando a Força de Empuxo para uma pressão interna de 6 atm e volume de 40% de água (800 ml):

Usando a Eq. (3), tem-se:

$$A_2 = 0,00005701237 \text{ m}^2.$$

$$P = 600.000 \text{ Pascal.}$$

$$P_a = 100.000 \text{ Pascal.}$$

$$F = 2 \cdot 0,00005701237 (600.000 - 100.000)$$

$$\mathbf{F = 57 N}$$

Comparando com o experimento da Fig. (14) com a mesma pressão, tem-se um erro de 8,75%.

5. ANÁLISE DOS RESULTADOS

Os resultados obtidos neste estudo mostram satisfatoriamente o desempenho do motor e mesmo sob simplificações, o valor experimental ficou próximo ao obtido pelas equações de Newton e Torricelli. Entretanto, é importante salientar que a Força de Empuxo carece de um maior rigor matemático, onde se aplica o Cálculo Diferencial e Integral. Uma abordagem mais precisa seria o uso do método iterativo de Runge-Kutta uma vez que a massa de água varia em função do tempo.

Na captura do sinal via *Labview*, observa-se que há uma força contrária ao empuxo no início da exaustão de água. Esta força é provocada manualmente, quando é feita a abertura do engate rápido (ele é puxado pra baixo para dar início à ejeção). O valor capturado também contém um desvio até seu valor máximo devido à histerese mecânica.

Lembrando que a utilização dessa balança é para fins didáticos, o equipamento é simples. Contudo, o sistema de aquisição permite abordagens mais complexas, necessitando, apenas, de uma balança melhor elaborada.

6. CONCLUSÕES

O estudo de foguetes é um grande incentivo para a Matemática e para a Física. Pode-se agregar a ele uma série de equipamentos que desenvolverão novos estudos envolvendo o tema e motivarão o aluno. Além do estudo teórico, o foguete poderá ser lançado, possibilitando uma comparação entre os resultados medidos e calculados. Experimentalmente, o alcance do foguete pode ser determinado com um Teodolito e com o Teorema de Pitágoras; com uma câmera de alta velocidade pode-se determinar o tempo de ejeção de água e aprimorar os resultados; utilizando cálculo diferencial e integral pode-se determinar teoricamente o empuxo levando-se em consideração a derivação da massa; entre outras tantas possibilidades para o ensino de Engenharia e suas ciências básicas.

O assunto, que envolve um grande conhecimento de matemática e mecânica dos fluidos, pode também ser tratado de maneira simplificada, mas não se deve deixar de observar sempre que há abordagens mais sofisticadas e apropriadas.

O aluno que desenvolve um projeto extracurricular se diferencia dos seus colegas por ter aplicado os conhecimentos de sala em um projeto prático. Certamente, a aprendizagem é facilitada quando há um agente motivador prático aliado aos estudos teóricos.

7. AGRADECIMENTOS

Ao Técnico Jaime Marini do Laboratório de Eletrônica Embarcada da EESC-USP e ao Técnico José Claudio Pinto de Azevedo do Laboratório de Aeronaves EESC-USP.

8. REFERÊNCIAS

- Fox, W. R., McDonald, A. T. (1992). Introdução à Mecânica dos Fluidos, 4ª edição. LTC. 662 páginas. Rio de Janeiro – RJ
- Izola, D. T. (1993). Métodos de Cálculos para Mini-foguetes. FATEC – SP. 174 páginas. São Paulo – SP.
- Izola, D. T. (1994). História dos Foguetes no Brasil – IME, Instituto Militar de Engenharia. FAT – Fundação de Apoio à Tecnologia. 87 páginas. São Paulo – SP.
- Sears, W. S., Zemansky, M. W. (1963). Física, 2ª edição. LTC. 487 páginas. Rio de Janeiro – RJ.



VI CONGRESSO NACIONAL DE ENGENHARIA MECÂNICA
VI NATIONAL CONGRESS OF MECHANICAL ENGINEERING
18 a 21 de agosto de 2010 – Campina Grande – Paraíba - Brasil
August 18 – 21, 2010 – Campina Grande – Paraíba – Brazil

DEVELOPMENT AND CALIBRATION OF BALANCE GAUGE FOR DIDACTIC ROCKET THRUST MEASUREMENT

EL DROUBI, Ashraf, a_droubi@hotmail.com¹
ARAUJO, Thiago Rocha, thiago.rocha.araujo@usp.br¹
BAKKENIST, Hendrik, hendrik_hba2@hotmail.com¹
GRECO, Paulo Celso, pgreco@sc.usp.br¹
IZOLA, Dawson Tadeu, dawson@sc.usp.br¹
MONTEIRO, Fernanda do Nascimento, nanda_nm@yahoo.com.br¹

¹Escola de Engenharia de São Carlos – EESC – USP, Av. Trabalhador São Carlense, 400, Centro, São Carlos – SP
CEP: 13566-590

Abstract: *The balance is an equipment that measures the static thrust of didactic rocket models of small size powered by water and compressed air. The rocket's thrust force during the water ejection is measured through a load cell. The signal from the measuring equipment is processed through an amplifier and sent to a supervisory software module was developed for data acquisition and analysis. The thrust meter equipment consists of a tripod with three legs of 1.7 meters each. The load cell is fixed at the inner side of the tripod at the conjunction of the rods, above which the rocket is set to an upright position. During operation, the jet engine exerts forces in various directions and with different magnitudes. To minimize the problem of motion generated by the forces and also of caused friction between moving parts, a single fixed load cell was used. Calibration was performed using Standard Weights on a scale representing the performance of the rocket. The data obtained through the thrust measurement may be used for engineering studies and helps attain a better understanding of physics and mathematics involved in this type of system. With the thrust force, resultant, and time of engine operation obtained from the static test, the speed and range of the rocket is determined.*

Keywords: *Balance gauge, didactic rocket models, engineering education.*