

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

CON10-1568

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. Existem inúmeras aplicações, como uso bélico militar, coleta de dados atmosféricos, veículo lançador de satélites e naves espaciais.

Pequenos foguetes obedecem às mesmas Leis Físicas dos foguetes maiores (Figuras 1 e 2). Mesmo utilizando-se de muitas simplificações matemáticas é possível conseguir bons resultados experimentais, tais resultados que quando comparados com os teóricos apresentam erro tolerável, observando-se que o objetivo é didático.

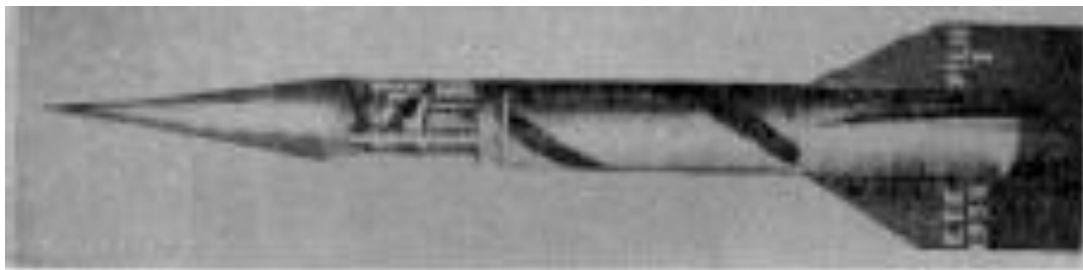


Figura 1. Foguete Félix 1. (1958) – Exército Brasileiro. Alcance 120 km. Carga útil 30 kg.

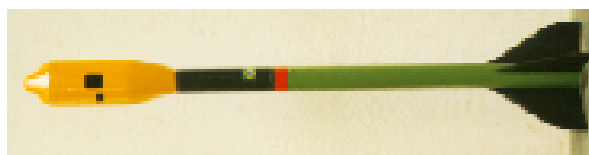


Figura 2. Foguete para foto aérea (1994) – Fatec - SP. Alcance 2 km. Carga útil 0,5 kg.

O estudo de pequenos foguetes desperta no aluno o interesse em compreender um problema físico-matemático na prática. Aplicando-se a teoria pode-se chegar a resultados práticos satisfatórios e o aluno é agente ativo neste processo.

A abordagem é a mais simples possível, inclusive na construção da balança, embora se utilize equipamentos sofisticados para a coleta de dados. Pode-se apresentar ainda, a cada passo, alternativas mais elaboradas e outras abordagens para solução do problema. Neste trabalho optou-se por uma abordagem superficial para o equacionamento dos problemas, utilizando as Leis de NEWTON como base.

A abordagem simplificada no primeiro instante deve-se ao envolvimento do aluno com ciências exatas no início de um curso de graduação. Entretanto, pode-se desenvolver esta atividade com mais profundidade em atividades extracurriculares, podendo inclusive fazer parte do projeto de conclusão de curso do aluno.

Na década de 1960, motivado pela Corrida Espacial, o governo Norte Americano criou, nas escolas da rede federal de ensino médio, núcleos para atividades educativas espaciais. Muitos dos jovens que participaram desta atividade, hoje fazem parte do programa espacial americano.

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

2. METODOLOGIA

A balança foi montada em um tripé. A célula de carga é fixada na junção superior dos pés. Uma haste conecta a célula de carga ao alojamento da garrafa PET. Uma mesa fixada por três tirantes, apoia a garrafa ao tripé e anula a força peso da garrafa e do conjunto motor-foguete, pois a força de empuxo é contrária à força peso.

2.1 Balança



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

O motor de garrafa PET tem volume interno de 2 litros. Neste estudo, variou-se o volume de água em 20, 30 e 40% do volume da garrafa e a pressão interna entre 300 kPa e 600 kPa. Com a bomba de ar bombeia-se ar para a garrafa, observando-se a pressão indicada no manômetro. Com o sistema carregado, abre-se o engate rápido, registrando-se assim o empuxo por intermédio de um sistema de aquisição de dados.

2.2 Sistema de aquisição

Foi utilizada uma célula de carga LBM para medir a força de empuxo do foguete com uma ponte completa de extensômetros com 4 conectores na saída. O sinal 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.

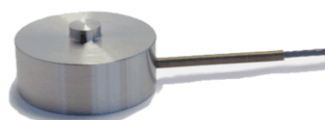


Figura 4. Célula de carga LBM.

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

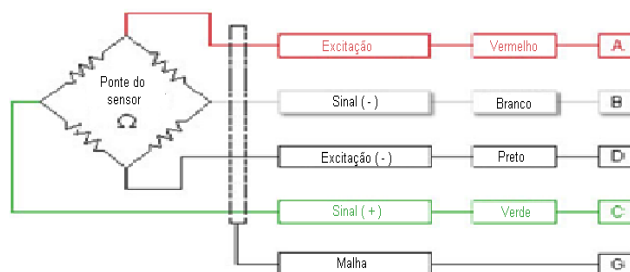


Figura 5. Célula de carga LBM, circuito e conexões.

2.3 Calibração da balança

Para a calibração da balança, foram utilizadas massas de referências previamente calibradas e relacionadas com a 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.

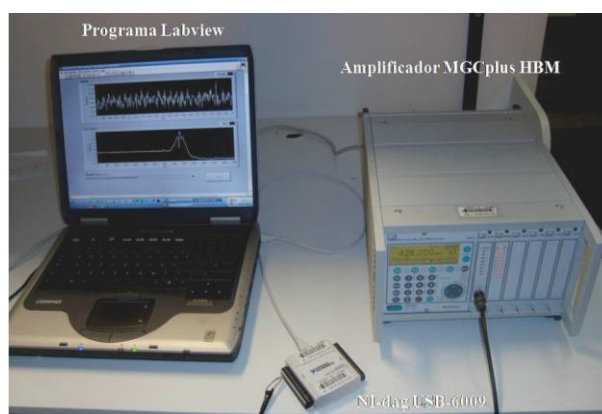


Figura 6. Sistema de aquisição.

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

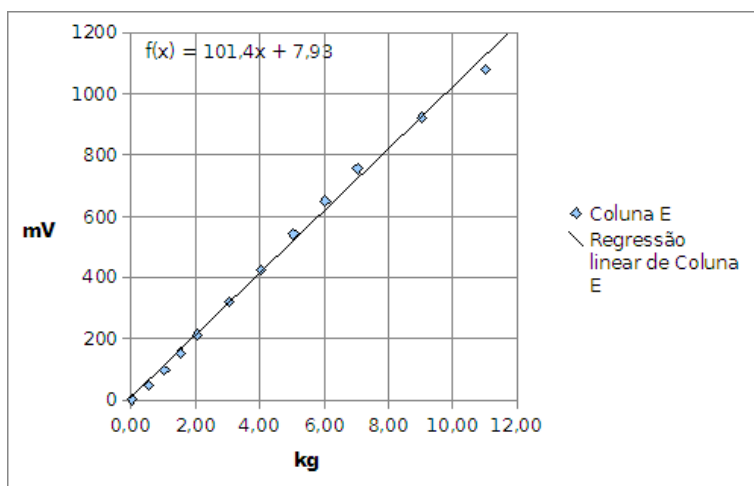


Figura 7. Relação entre kg e mV.

2.4 Programa de interface no Labview

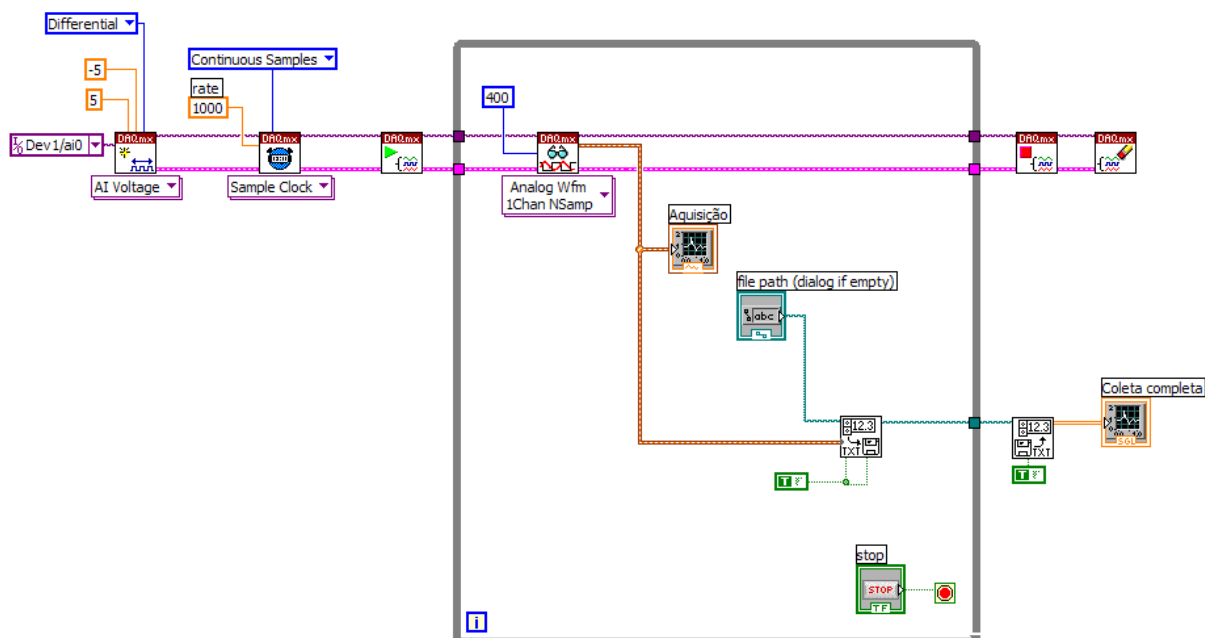


Figura 8. Diagrama de blocos do Labview

3. RESULTADOS

O experimento foi realizado em várias configurações variando-se a pressão (em atm) e a quantidade de água a cada ensaio, como segue:

Tabela 3. Dados dos ensaios

n	Pressão (atm)	Porcentagem do volume da garrafa em água (%)	Volume de água	Força de empuxo (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.

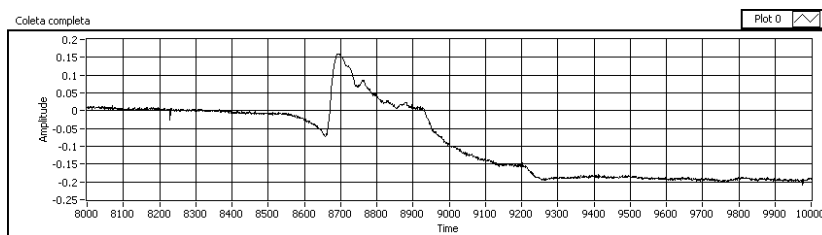


Figura 9. 3 atm, 20% de água (400ml).

O gráfico da Figura 9 mostra um valor máximo de 0.16 V correspondente a um máximo valor de empuxo de 1.6 kg.

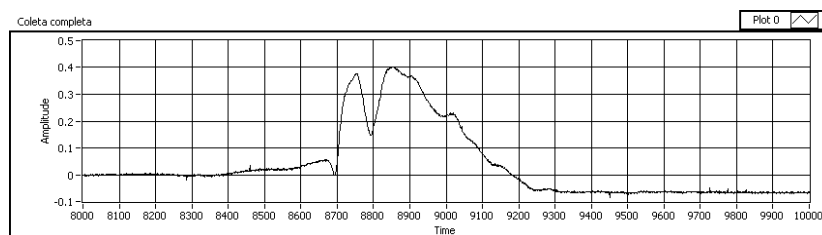


Figura 10. 4 atm, 20% de água (400ml).

O gráfico da Figura 10 mostra um valor máximo de 0.4 V correspondente a um máximo valor de empuxo de 4 kg.

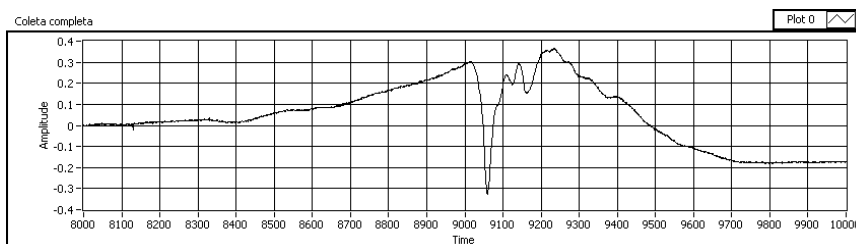


Figura 11. 5 atm, 20% de água (400ml).

O gráfico da Figura 11 mostra um valor máximo de 0.35 V correspondente a um máximo valor de empuxo de 3.5 kg.

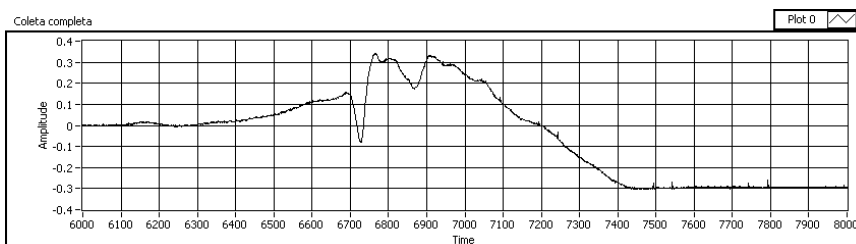


Figura 12. 5 atm, 30% de água (600ml).

O gráfico da Figura 12 mostra um valor máximo de 0.34 V correspondente a um máximo valor de empuxo de 3.4 kg.

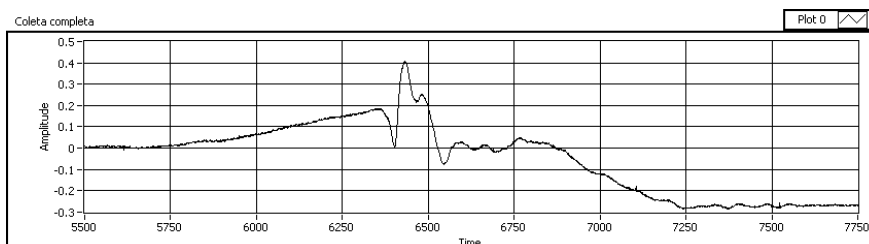


Figura 13. 5 atm, 40% de água (800 ml).

O gráfico da Figura 13 mostra um valor máximo de 0.40 V correspondente a um máximo valor de empuxo de 4 kg.

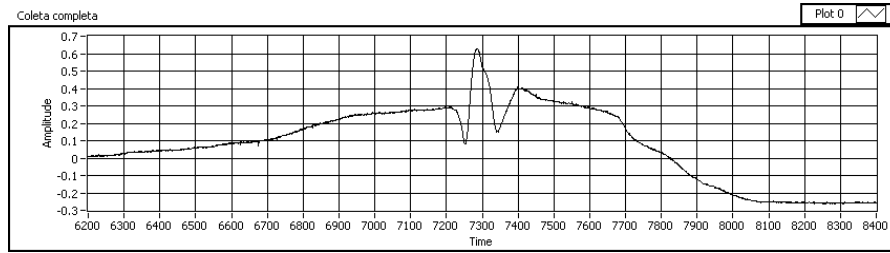


Figura 14. 6 atm, 40% de água (800 ml).

O gráfico da Figura 14 mostra um valor máximo de 0.62 V correspondente a um máximo valor de empuxo de 6.2 kg.

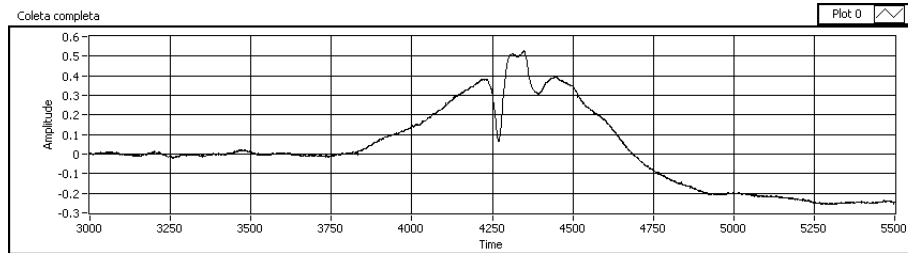


Figura 15. 6 atm, 30% de água (600 ml).

O gráfico da Figura 15 mostra um valor máximo de 0.51 V correspondente a um máximo valor de empuxo de 5.1 kg.

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 empuxo, ou força de reação. A mecânica do problema é a mesma que envolve a propulsão a jato.

Sob algumas condições que a equação de Bernoulli possa ser aplicada, pode-se calcular o empuxo no 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 expelida no tempo dt será $\rho \cdot A_2 \cdot v_2 \cdot dt$ e seu momento 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 (Velocidade de 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 consequentemente $\rho \cdot A_2 \cdot (v_2)^2$ que, pela Segunda Lei de Newton, é igual à Força que atua sobre ele.

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:

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

Onde:

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

A Força de reação pode ser escrita como:

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

Simplificando:

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

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 ($P - P_a$). 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 Equação 3, tem-se:

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

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

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

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

$$\mathbf{F = 57,01237 \text{ N}}$$

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

5. ANÁLISE DOS RESULTADOS

Os resultados obtidos neste estudo preliminar indicam satisfatoriamente o desempenho observado do motor-foguete. Entretanto, é importante salientar que a Força de Empuxo carece de um maior rigor matemático, onde se aplica o Cálculo Diferencial e Integral. Pois a massa de água varia em função do tempo dm/dt . Uma abordagem mais precisa seria um método iterativo por Runge-Kutta.

Mesmo utilizando-se de fatores simplificadores do problema, o valor experimental ficou próximo ao obtido pelas equações de Newton e Torricelli.

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 da abertura do engate rápido. O engate fêmea é puxado para baixo para iniciar a ejeção. O valor capturado também oscila até um valor máximo, este erro está relacionado à histerese mecânica. A balança não é rígida o suficiente. Como a utilização é para fins didáticos, o equipamento é simples, entretanto o sistema de aquisição permite abordagens mais complexas, neste caso, necessitando de uma balança melhor elaborada.

6. CONCLUSÕES

O objeto de estudo em questão, foguetes, é um grande incentivo aos alunos para o estudo de Matemática e Física. Pode-se agregar a este estudo uma série de equipamentos que se desenvolverão em novos estudos envolvendo o tema. O foguete poderá ser lançado, pode-se calcular e medir o alcance, comparando os resultados. Com um Teodolito e utilizando o Teorema de Pitágoras, pode-se determinar experimentalmente o alcance do foguete. 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 do foguete levando-se em consideração a derivação da massa.

O assunto, embora envolva um grande conhecimento em matemática e mecânica dos fluidos, pode também ser tratado de maneira simplificada observando 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 de aula em um projeto prático. Certamente, a aprendizagem é facilitada quando há um agente motivador prático aliado aos estudos teóricos.

7. AGRADECIMENTO

Ao Técnico Jaime Marini do Laboratório de Eletrônica Embarcada da EESC-USP.

8. BIBLIOGRAFIA

IZOLA, D. T. (1993). Métodos de Cálculos para Mini-foguetes. FATEC-SP. 174 páginas. São Paulo – SP.

IZOLA, D. T. (1994). Historia dos Foguetes no Brasil – IME, Instituto Militar de Engenharia. FAT – Fundação de Apoio à Tecnologia. 87 páginas. São Paulo – SP.



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

CON10-1568

Abstract: *The balance is an equipment that measures the static thrust of didactic small size rocket models 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 was processed through an amplifier and sent to a supervisory software module that was developed for data acquisition and analysis. The thrust measure 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 legs junction, onto which the rocket is placed at an upright position. During the operation, the jet engine pushes the equipment at several directions and with different strengths. To reduce the movement generated by the forces and also the friction caused by moving parts, a single fixed load cell was used. Calibration was performed using Standard Weights on a scale representing the rocket's performance. The data obtained through the thrust measurement may be used for engineering studies and help to have a better understanding of the physics and mathematics involved in this type of system. The static test allows the determination of the rocket's range and speed through the engine operation time, thrust force, weight and the resultant.*

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