

Testes estáticos de 28 Set 2009 de motores-foguete do tipo BT (Bandeirante) de espaçomodelos

Relatório referente ao projeto de ensino

Desenvolvimento de kit didático de minifoguetes para difusão e popularização da Astronáutica (AEN-2)

apoiado financeiramente pelo

Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq)
através do Edital MCT/CNPq 42/2007 – Difusão e Popularização da C&T

Prof. **Carlos Henrique Marchi**, Dr. Eng. Mec.

Universidade Federal do Paraná (UFPR)

Setor de Tecnologia (TC)

Departamento de Engenharia Mecânica (DEMEC)

Curitiba, 29 de novembro de 2009.

1 INTRODUÇÃO

Este relatório descreve 18 testes estáticos com motores-foguete de espaçomodelos a propelente sólido do tipo BT (Bandeirante). Os testes foram realizados em 28 de setembro de 2009, na Universidade Federal do Paraná, e referem-se ao projeto *Desenvolvimento de kit didático de minifoguetes para difusão e popularização da Astronáutica (AEN-2)*. Os objetivos dos testes eram: (1) obter curvas de empuxo *versus* tempo e parâmetros de desempenho de três classes de motores-foguete do tipo BT; (2) verificar a incerteza do desempenho destes motores; e (3) verificar o efeito sobre o desempenho dos motores causado por lotes de fabricação diferentes.

2 DESCRIÇÃO DOS MOTORES-FOGUETE

As Figuras 1 a 3 mostram seis fotos dos 18 motores-foguete testados. Estes motores foram fabricados em julho de 2009 pela Bandeirante (Boa Vista Modelismo Ltda.), de São Lourenço da Mata (PE). A estrutura externa de cada motor é um tubo de papelão cilíndrico circular. Internamente, cada motor tem uma tubeira, carga propulsora de pólvora negra e tampa de fechamento. Estes motores não possuem carga temporizadora nem ejetora. Eles são motores do tipo *booster*. A coluna Classe, na Tabela 1, indica a classe, de cada motor testado, segundo o fabricante dos motores, e que segue a classificação da NAR (2004).



Figura 1. Fotos mostrando os motores-foguete BT-25 a BT-30 do tipo A6.

A Tabela 1 apresenta os seguintes dados sobre cada motor-foguete testado: D_e = diâmetro externo; L_t = comprimento total; M_o = massa total do motor antes da queima do propelente; M_f = massa total do motor depois da queima do propelente; e M_p = massa de propelente. Cada valor de D_e e L_t na Tabela 1 é o resultado de uma única medida, obtida com um paquímetro digital Lee Tools, com escala de 150 mm e menor divisão de escala de 0,01 mm. M_o e M_f foram medidos com

uma balança Gehaka AG200 (Figura 4), com menor divisão de escala de 0,0001 g e erro máximo de 0,001 g. M_p foi calculado através da seguinte equação:

$$M_p = M_o - M_f \quad (1)$$

Portanto, admite-se que a massa de propelente é a diferença entre a massa total do motor-foguete antes e depois da queima.

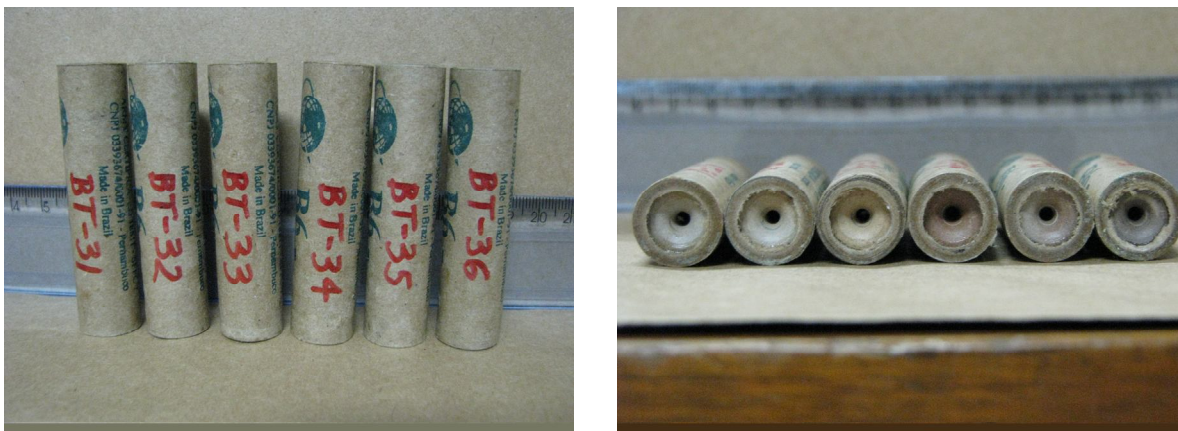


Figura 2. Fotos mostrando os motores-foguete BT-31 a BT-36 do tipo B6.



Figura 3. Fotos mostrando os motores-foguete BT-37 a BT-42 do tipo C6.

O motor BT-42 ejetou a sua tubeira durante a queima. Esta foi encontrada após o teste, em três pedaços, que foram juntados ao motor para obter o valor de M_f .

A Tabela 2 apresenta os valores médios e suas respectivas incertezas expandidas (U) dos dados da Tabela 1. Cada valor da Tabela 2 foi obtido pela média aritmética dos valores de cada classe de motor. A incerteza expandida (U) foi obtida através do procedimento descrito em ABNT (1997), que considera: fator de abrangência k de acordo com o número de graus de liberdade

(número de dados menos a unidade) de cada parâmetro; e distribuição t para nível de confiança de 95%, conforme recomendação de JHT (1993).

Tabela 1. Dados sobre cada motor-foguete.

| Classe | Motor | De (mm) | Lt (mm) | Mo (g) | Mf (g) | Mp (g) |
|--------|-------|---------|---------|--------|--------|--------|
| A6 | BT-25 | 17,41 | 71,43 | 12,664 | 10,627 | 2,037 |
| | BT-26 | 17,38 | 71,72 | 13,044 | 11,093 | 1,951 |
| | BT-27 | 17,39 | 71,79 | 12,693 | 10,891 | 1,802 |
| | BT-28 | 17,53 | 72,04 | 12,809 | 10,876 | 1,933 |
| | BT-29 | 17,61 | 71,50 | 13,485 | 11,630 | 1,855 |
| | BT-30 | 17,31 | 71,74 | 12,223 | 10,445 | 1,778 |
| B6 | BT-31 | 17,36 | 71,48 | 15,481 | 10,394 | 5,087 |
| | BT-32 | 17,27 | 71,36 | 15,148 | 10,276 | 4,872 |
| | BT-33 | 17,38 | 71,25 | 15,679 | 10,889 | 4,790 |
| | BT-34 | 17,46 | 71,37 | 15,198 | 10,706 | 4,492 |
| | BT-35 | 17,40 | 71,46 | 15,739 | 10,425 | 5,314 |
| | BT-36 | 17,12 | 71,31 | 15,155 | 10,533 | 4,622 |
| C6 | BT-37 | 17,49 | 71,42 | 17,873 | 10,558 | 7,315 |
| | BT-38 | 17,26 | 71,28 | 17,688 | 10,335 | 7,353 |
| | BT-39 | 17,53 | 71,69 | 17,807 | 10,528 | 7,279 |
| | BT-40 | 17,40 | 71,07 | 17,467 | 10,440 | 7,027 |
| | BT-41 | 17,50 | 71,47 | 17,842 | 10,613 | 7,229 |
| | BT-42 | 17,74 | 71,71 | 17,993 | 10,806 | 7,187 |

Tabela 2. Valores médios e suas incertezas (U) dos dados da Tabela 1.

| Motores | BT-25 a 30 | BT-31 a 36 | BT-37 a 42 |
|--------------|------------|------------|------------|
| De (mm) | 17,44 | 17,33 | 17,49 |
| U de De (mm) | 0,28 | 0,31 | 0,41 |
| U de De (%) | 1,6 | 1,8 | 2,3 |
| Lt (mm) | 71,70 | 71,37 | 71,44 |
| U de Lt (mm) | 0,56 | 0,22 | 0,63 |
| U de Lt (%) | 0,78 | 0,32 | 0,88 |
| Mo (g) | 12,8 | 15,40 | 17,78 |
| U de Mo (g) | 1,1 | 0,69 | 0,47 |
| U de Mo (%) | 8,5 | 4,5 | 2,6 |
| Mf (g) | 10,9 | 10,54 | 10,55 |
| U de Mf (g) | 1,1 | 0,58 | 0,41 |
| U de Mf (%) | 9,7 | 5,5 | 3,9 |
| Mp (g) | 1,89 | 4,86 | 7,23 |
| U de Mp (g) | 0,25 | 0,78 | 0,30 |
| U de Mp (%) | 13 | 16 | 4,1 |

Da Tabela 2, destaca-se o seguinte:

- 1) As incertezas de De ficam entre 1,6 e 2,3%, e 0,28 e 0,41 mm.
- 2) As incertezas de Lt ficam entre 0,32 e 0,88%, e 0,22 e 0,63 mm.
- 3) As incertezas de Mo e Mf ficam entre 2,6 e 9,7%, e 0,41 e 1,1 g.
- 4) As incertezas de Mp ficam entre 4,1 e 16%, e 0,25 e 0,78 g.
- 5) Em termos absolutos (g), as incertezas de Mp são do mesmo nível das incertezas absolutas de Mo e Mf. Porém, as incertezas relativas (%) de Mp são maiores porque os valores absolutos de Mp são menores do que os de Mo e Mf.

3 DESCRIÇÃO DOS TESTES ESTÁTICOS

Os 18 testes estáticos foram realizados em 28 de setembro de 2009, entre 13:40 e 14:40 h, no Laboratório de Máquinas Hidráulicas, do Departamento de Engenharia Mecânica, da Universidade Federal do Paraná, em Curitiba, PR. Fotos e vídeos dos testes realizados podem ser vistos em <ftp://ftp.demec.ufpr.br/foguete/> (2009). Durante os testes, a temperatura ambiente variou entre 20,2 e 21,6 °C e a pressão atmosférica entre 90,31 e 90,36 kPa. As temperaturas e pressões foram medidas com o equipamento RA123 da Oregon Venture (Figura 4).



Figura 4. Fotos mostrando a balança e o medidor de temperatura e pressão usados.

Foram empregados ignitores fabricados em outubro de 2008 e julho de 2009 pela Bandeirante (Figura 5). O sistema de ignição usado foi o Quest, que usa bateria de 9 V e cujo condutor elétrico tem cerca de 5 m de comprimento (Figura 5). O sistema de aquisição de dados utilizado foi o Spider 8 da HBM (Hottinger Baldwin Messtechnik GmbH), com o aplicativo computacional Catman 4.5. A célula de carga empregada foi do tipo S2, de 50 N, da HBM (Figura 6), cuja classe de acurácia é de 0,025 N. A bancada experimental pode ser vista na Figura 6.

Durante cada teste estático, obteve-se a força de empuxo do motor durante o tempo de queima do propelente com frequência de aquisição de dados de 200 Hz, resultando em 0,005 s o intervalo de tempo entre duas medidas consecutivas. Os motores-foguete ficaram com seu eixo longitudinal na posição horizontal durante a queima, como pode ser visto na Figura 6.

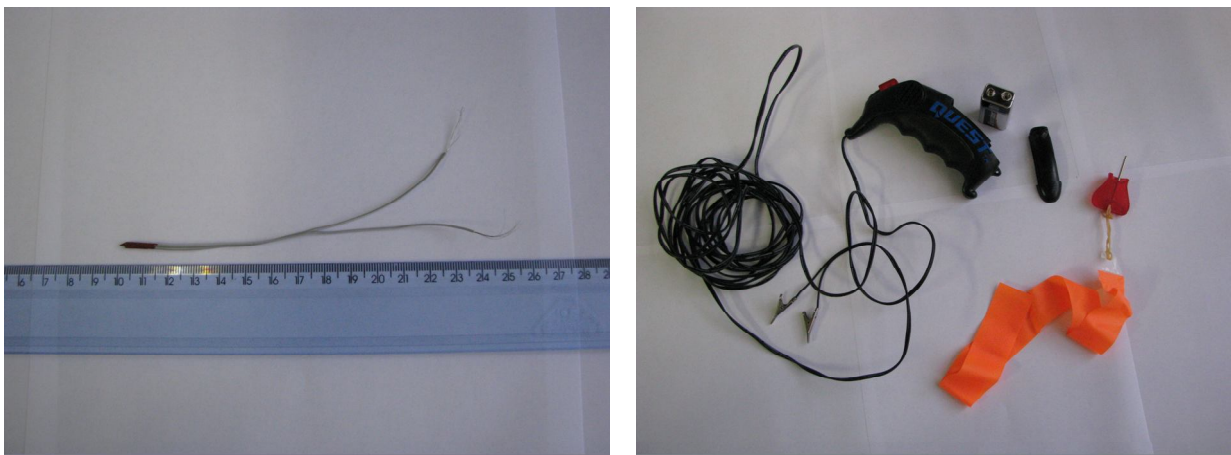


Figura 5. Fotos mostrando o tipo de ignitor e o sistema de ignição usados nos testes.

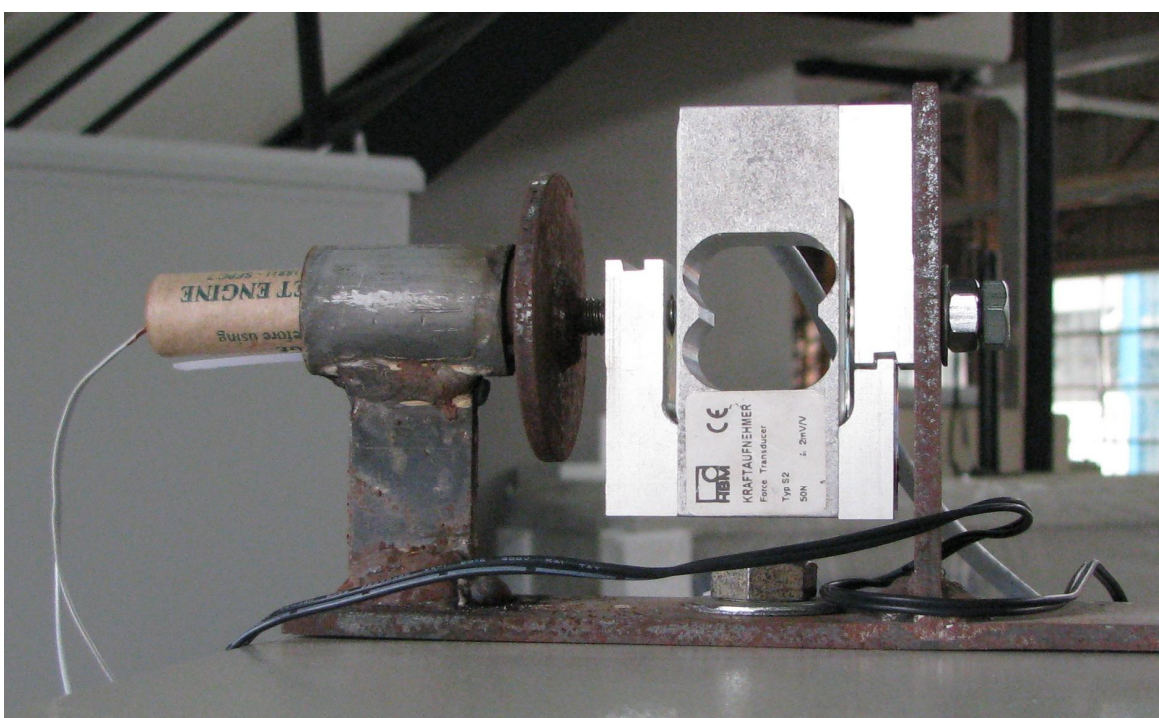


Figura 6. Foto da bancada experimental mostrando a célula de carga S2-50 da HBM e um motor preparado para o teste estático, já com o seu ignitor.

4 RESULTADOS

As Figuras 7 a 9 mostram os motores BT-25, 31 e 37 durante seus testes estáticos, enquanto estavam queimando propelente. As imagens deste relatório foram captadas por uma câmara fotográfica Canon PowerShot S51S, de 8 megapixels (Figuras 1 a 6), e por uma filmadora Sony HDR-SR10, de 4 megapixels (Figuras 7 a 9).

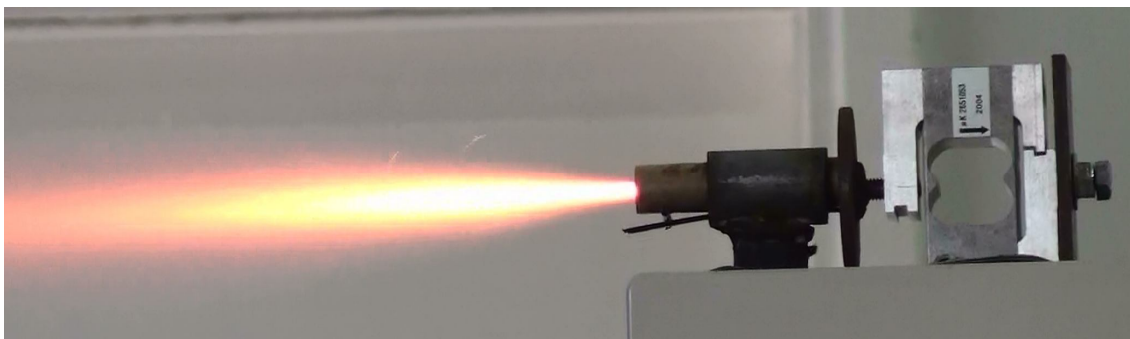


Figura 7. Foto mostrando o motor BT-25 durante o seu teste estático.



Figura 8. Foto mostrando o motor BT-31 durante o seu teste estático.



Figura 9. Foto mostrando o motor BT-37 durante o seu teste estático.

As Figuras A1 a A18, no Apêndice A, apresentam as curvas de empuxo *versus* tempo dos motores-foguete após o processamento dos resultados originais, obtidos pelo sistema de aquisição de dados da HBM. O início e fim de cada curva foram definidos com o valor do empuxo em 0,25 N. Este valor representa dez vezes o menor erro da célula de carga usada. Conforme análises realizadas: valores menores podem captar ruído da célula; e valores maiores podem afetar significativamente os resultados dos parâmetros da curva de empuxo. Mas existem outras formas de definir o início e o fim de uma curva de empuxo, como se pode ver em Brown (1996) e www.thrustcurve.org (2009). Das Figuras A1 a A18, no Apêndice A, verifica-se que as curvas de empuxo *versus* tempo de uma mesma classe de motores são qualitativamente bastante similares.

Nas Tabelas 3 e 4 são apresentados os resultados obtidos com o aplicativo computacional Curva_Empuxo 1.2, de 9 Nov 2008. Este aplicativo também foi usado na obtenção das curvas mostradas nas Figuras A1 a A18. A listagem deste aplicativo está no Apêndice B. Ele foi escrito em linguagem Fortran 90. No Apêndice C é mostrado o arquivo de dados deste aplicativo para o motor BT-25, e no Apêndice D, os respectivos resultados obtidos pelo aplicativo.

Tabela 3. Resultados principais das curvas de empuxo.

| Motor | tq (s) | Emed (N) | It (Ns) | Classe | Is (s) |
|-------|--------|----------|---------|--------|--------|
| BT-25 | 0,355 | 4,11 | 1,46 | A4 | 73,3 |
| BT-26 | 0,346 | 3,86 | 1,33 | A4 | 69,9 |
| BT-27 | 0,319 | 4,05 | 1,29 | A4 | 73,2 |
| BT-28 | 0,383 | 3,56 | 1,36 | A4 | 72,1 |
| BT-29 | 0,323 | 4,13 | 1,34 | A4 | 73,6 |
| BT-30 | 0,318 | 4,17 | 1,33 | A4 | 76,2 |
| BT-31 | 1,005 | 4,06 | 4,08 | B4 | 82,0 |
| BT-32 | 0,974 | 3,89 | 3,78 | B4 | 79,3 |
| BT-33 | 0,959 | 3,95 | 3,79 | B4 | 80,8 |
| BT-34 | 0,860 | 4,25 | 3,66 | B4 | 83,1 |
| BT-35 | 1,099 | 3,73 | 4,10 | B4 | 78,8 |
| BT-36 | 0,924 | 3,76 | 3,47 | B4 | 76,8 |
| BT-37 | 1,488 | 3,81 | 5,67 | C4 | 79,2 |
| BT-38 | 1,509 | 3,85 | 5,81 | C4 | 80,7 |
| BT-39 | 1,450 | 4,01 | 5,81 | C4 | 81,6 |
| BT-40 | 1,368 | 3,94 | 5,39 | C4 | 78,3 |
| BT-41 | 1,401 | 4,21 | 5,90 | C4 | 83,4 |
| BT-42 | 0,459 | 0,83 | 0,38 | ¼A1 | 5,4 |

Tabela 4. Resultados secundários das curvas de empuxo.

| Motor | E _{max} (N) | $\frac{E_{max}}{E_{med}}$ | $\frac{E_{min}}{E_{max}}$ (%) | f _m (g/s) | c (m/s) |
|-------|----------------------|---------------------------|-------------------------------|----------------------|---------|
| BT-25 | 6,55 | 1,59 | 3,82 | 5,73 | 718 |
| BT-26 | 6,62 | 1,72 | 3,78 | 5,64 | 684 |
| BT-27 | 6,34 | 1,57 | 3,94 | 5,65 | 716 |
| BT-28 | 7,21 | 2,02 | 3,47 | 5,05 | 706 |
| BT-29 | 6,41 | 1,55 | 3,90 | 5,74 | 720 |
| BT-30 | 7,49 | 1,80 | 3,34 | 5,59 | 746 |
| BT-31 | 7,02 | 1,73 | 3,56 | 5,06 | 802 |
| BT-32 | 8,20 | 2,11 | 3,05 | 5,00 | 776 |
| BT-33 | 7,98 | 2,02 | 3,13 | 4,99 | 791 |
| BT-34 | 8,35 | 1,96 | 3,00 | 5,22 | 814 |
| BT-35 | 6,54 | 1,75 | 3,82 | 4,83 | 772 |
| BT-36 | 6,58 | 1,75 | 3,80 | 5,00 | 752 |
| BT-37 | 6,48 | 1,70 | 3,86 | 4,91 | 775 |
| BT-38 | 6,87 | 1,78 | 3,64 | 4,87 | 790 |
| BT-39 | 7,55 | 1,88 | 3,31 | 5,02 | 798 |
| BT-40 | 7,35 | 1,87 | 3,40 | 5,14 | 766 |
| BT-41 | 9,73 | 2,31 | 2,57 | 5,16 | 816 |
| BT-42 | 8,03 | 9,66 | 3,11 | 15,67 | 53 |

O significado dos símbolos da Tabela 3 é o seguinte: tq = tempo de queima; Emed = empuxo médio; It = impulso total; classe = classificação do motor; e Is = impulso específico médio. O valor de tq foi obtido diretamente de cada curva empuxo *versus* tempo processada. Os demais parâmetros foram obtidos por meio das seguintes equações:

$$It = \int_0^{tq} E dt \quad (2)$$

$$E_{med} = \frac{I_t}{t_q} \quad (3)$$

$$I_s = \frac{I_t}{g M_p} \quad (4)$$

onde g é a aceleração local da gravidade; o valor usado foi $9,7876 \text{ m/s}^2$.

Na Eq. (2), E representa o empuxo em um determinado instante de tempo t . Para cada curva de empuxo, esta equação foi integrada numericamente por meio da regra do trapézio (Kreyszig, 1999).

Pode-se ver na Tabela 3 que os 18 motores testados se enquadram em quatro classes, conforme o intervalo de impulso total: $\frac{1}{4}A = 0,3126$ a $0,625$ Ns; $A = 1,26$ a $2,50$ Ns; $B = 2,51$ a $5,00$ Ns; e $C = 5,01$ a $10,00$ Ns. Estes intervalos e letras seguem o padrão adotado pela NAR (2004). O número que fica após a letra na classe representa o valor do empuxo médio arredondado para um número inteiro; não está claro na literatura a forma de obter este valor.

O significado dos símbolos da Tabela 4 é o seguinte: E_{max} = empuxo máximo; E_{min} = empuxo mínimo, fixo em $0,25$ N; f_m = fluxo de massa médio do propelente; e c = velocidade de ejeção efetiva média dos gases. O valor de E_{max} foi obtido diretamente de cada curva empuxo *versus* tempo processada. Os demais parâmetros foram obtidos com

$$f_m = \frac{M_p}{t_q} \quad (5)$$

$$c = \frac{I_t}{M_p} \quad (6)$$

A Tabela 5 apresenta os valores médios e suas respectivas incertezas expandidas (U) dos resultados mostrados nas Tabelas 3 e 4. Cada valor médio foi obtido pela média aritmética dos valores de cada classe de motor. Os resultados do motor BT-42 não foram considerados nos valores mostrados na Tabela 5 devido à ejeção da tubeira, que ocorreu durante a queima do propelente. A incerteza expandida (U) foi obtida através do procedimento descrito em ABNT (1997), que considera: fator de abrangência k de acordo com o número de graus de liberdade (número de dados menos a unidade) de cada parâmetro; e distribuição t para nível de confiança de 95%, conforme recomendação de JHT (1993).

Tabela 5. Valores médios e suas incertezas (U) dos resultados mostrados nas Tabelas 3 e 4.

| Motores | BT-25 a 30 | BT-31 a 36 | BT-37 a 42 |
|---------------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
| Classe | A4 | B4 | C4 |
| It (Ns) | 1,35 | 3,81 | 5,72 |
| U de It (Ns) | 0,15 | 0,63 | 0,56 |
| U de It (%) | 11 | 16 | 9,7 |
| Emed (N) | 3,98 | 3,94 | 3,96 |
| U de Emed (N) | 0,60 | 0,50 | 0,44 |
| U de Emed (%) | 15 | 13 | 11 |
| tq (s) | 0,341 | 0,97 | 1,44 |
| U de tq (s) | 0,066 | 0,21 | 0,16 |
| U de tq (%) | 19 | 21 | 11 |
| Is (s) | 73,1 | 80,1 | 80,6 |
| U de Is (s) | 5,3 | 5,9 | 5,6 |
| U de Is (%) | 7,2 | 7,4 | 6,9 |
| E _{max} (N) | 6,8 | 7,4 | 7,6 |
| U de E _{max} (N) | 1,2 | 2,1 | 3,5 |
| U de E _{max} (%) | 18 | 29 | 46 |
| fm (g/s) | 5,57 | 5,02 | 5,02 |
| U de fm (g/s) | 0,67 | 0,32 | 0,36 |
| U de fm (%) | 12 | 6,4 | 7,2 |
| c (m/s) | 715 | 784 | 789 |
| U de c (m/s) | 52 | 58 | 54 |
| U de c (%) | 7,3 | 7,3 | 6,9 |

Das Tabelas 3 a 5, destaca-se o seguinte:

- 1) O empuxo médio de todos os motores testados é 3,96 N, ou 4 N ao se arredondar Emed para um número inteiro. Sua incerteza pode chegar a 15%.
- 2) São quase constantes em todos os motores: Is (78 s); fm (5,2 g/s); e c (760 m/s). Suas incertezas podem chegar a 12%.
- 3) O tempo de queima (tq) e o impulso total (It) são quase lineares com a massa de propelente (Mp). Suas incertezas podem chegar a 21%.
- 4) Considerando-se os itens 1 a 3, conclui-se que o grão-propelente é quase de geometria cilíndrica, sem perfuração, com queima do tipo cigarro.
- 5) As incertezas de E_{max} ficam entre 18 e 46%.
- 6) O fabricante denota seus motores como A6, B6 e C6. Porém, de acordo com os testes realizados, eles deveriam ser classificados como A4, B4 e C4.

A Tabela 6 apresenta resultados de alguns motores, de três fabricantes dos Estados Unidos, certificados pela NAR (2009), bem como os resultados dos motores BT. Para ser possível a comparação entre os motores certificados e os motores BT, em vez da incerteza expandida (U) utiliza-se a incerteza padronizada (σ), também conhecida por desvio-padrão (ABNT, 1997). A relação entre estes dois tipos de incerteza é $U = k\sigma$, onde k é o fator de abrangência, que depende do número de graus de liberdade (número de dados menos a unidade) de cada parâmetro e da

distribuição t para o nível de confiança desejado. Para um número infinito de dados de um determinado parâmetro, $k = 1$ para nível de confiança de 68,27%; neste caso, $U = \sigma$.

Tabela 6. Valores médios e seus desvios-padrão (σ) de alguns tipos de motores.

| Classe | A2 | A6 | A6 | B6 | B6 | B6 | C6 | C6 | C6 |
|----------------------------------|--------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Fabricante | Apogee | Quest | BT | Estes | Quest | BT | Estes | Quest | BT |
| It (Ns) | 2,47 | 2,30 | 1,35 | 4,33 | 4,63 | 3,81 | 8,82 | 8,85 | 5,72 |
| σ de It (Ns) | 0,05 | 0,03 | 0,06 | 0,08 | 0,15 | 0,24 | 0,18 | 0,21 | 0,20 |
| σ de It (%) | 2,0 | 1,3 | 4,4 | 1,8 | 3,2 | 6,3 | 2,0 | 2,4 | 3,5 |
| tq (s) | 1,31 | 0,55 | 0,341 | 0,86 | 0,75 | 0,970 | 1,86 | 2,24 | 1,443 |
| σ de tq (s) | 0,06 | 0,01 | 0,026 | 0,15 | 0,07 | 0,080 | 0,31 | 0,04 | 0,059 |
| σ de tq (%) | 4,6 | 1,8 | 7,6 | 17 | 9,3 | 8,2 | 17 | 1,8 | 4,1 |
| E _{max} (N) | 4,82 | 10,07 | 6,77 | 12,14 | 14,38 | 7,44 | 14,09 | 23,30 | 7,6 |
| σ de E _{max} (N) | 1,00 | 0,14 | 0,47 | 1,57 | 1,15 | 0,83 | 2,94 | 0,82 | 1,3 |
| σ de E _{max} (%) | 21 | 1,4 | 6,9 | 13 | 8,0 | 11 | 21 | 3,5 | 17 |
| E _{med2} (N) | 1,89 | 4,18 | 3,96 | 5,03 | 6,17 | 3,93 | 4,74 | 3,95 | 3,96 |
| Δ E _{med2} (N) | ? | 0,17 | 0,40 | ? | ? | 0,32 | ? | ? | 0,25 |
| Δ E _{med2} (%) | ? | 4,1 | 10 | ? | ? | 8,1 | ? | ? | 6,3 |
| M _p (g) | 3,0 | 3,5 | 1,89 | 5,6 | 6,5 | 4,86 | 10,8 | 12,0 | 7,23 |
| I _s (s) | 84 | 67 | 73,1 | 79 | 73 | 80,1 | 83 | 75 | 80,6 |

($g = 9,7876 \text{ m/s}^2$)

Da Tabela 6, destaca-se o seguinte:

- 1) O desvio-padrão do impulso total (It) dos motores BT fica entre 3,5 e 6,3%, e os demais motores entre 1,3 e 3,2%. Portanto, os motores BT das três classes (A6, B6 e C6), bem como os motores Apogee, Quest e Estes, atendem a um dos requisitos da norma NFPA 1125 (2007), que é o desvio-padrão de It não deve ser maior do que 6,7%. NFPA é a *National Fire Protection Association*, dos Estados Unidos. A sua norma 1125 trata da fabricação de motores de espaçomodelos e requer, para a certificação de cada tipo de motor, no mínimo dez testes estáticos; lembra-se que os resultados neste relatório são baseados em seis testes estáticos para cada tipo de motor BT.
- 2) O desvio-padrão do tempo de queima (tq) dos motores BT fica entre 4,1 e 8,2%, e os demais motores entre 1,8 e 17%.
- 3) O desvio-padrão do empuxo máximo (E_{max}) dos motores BT fica entre 6,9 e 17%, e os demais motores entre 1,4 e 21%.
- 4) O impulso específico (I_s) dos motores BT fica entre 73 e 81 s, e os demais motores entre 67 e 84 s.
- 5) A variação máxima do empuxo médio (Δ E_{med2}) de cada classe de motor BT é de no máximo 0,40 N. Portanto, os motores BT atendem a um dos requisitos da norma NFPA 1125 (2007), que é Δ E_{med2} ser menor do que 1 N. Para cada classe de motor, Δ E_{med2} é a variação máxima entre os valores de E_{med2} (razão entre o It e o tq dos valores da Tabela 5 para cada classe de motor) e E_{med} (Tabela 3).

- 6) Dos itens 1 a 5, conclui-se que os motores BT são da mesma qualidade de fabricantes dos Estados Unidos em relação aos parâmetros avaliados (It, tq, Emax, Is e Δ Emed2), e atendem a dois requisitos da norma NFPA 1125; apenas estes dois requisitos foram possíveis de serem avaliados com os testes realizados.

Tabela 7. Comparação entre os motores BT de 2008 e 2009.

| Classe segundo o fabricante | A6 | | B6 | | C6 | |
|----------------------------------|-----------|------------|------------|------------|------------|------------|
| Motores | BT-7 a 12 | BT-25 a 30 | BT-13 a 18 | BT-31 a 36 | BT-19 a 24 | BT-37 a 42 |
| Data de fabricação | Out/2008 | Jul/2009 | Out/2008 | Jul/2009 | Out/2008 | Jul/2009 |
| De (mm) | 17,59 | 17,44 | 17,48 | 17,33 | 17,40 | 17,49 |
| U de De (%) | 1,6 | 1,6 | 1,5 | 1,8 | 2,1 | 2,3 |
| Lt (mm) | 80,4 | 71,70 | 80,7 | 71,37 | 79,9 | 71,44 |
| U de Lt (%) | 3,1 | 0,78 | 1,5 | 0,32 | 4,7 | 0,88 |
| Mo (g) | 14,78 | 12,8 | 17,99 | 15,40 | 21,0 | 17,78 |
| U de Mo (%) | 3,2 | 8,5 | 5,2 | 4,5 | 5,6 | 2,6 |
| Mf (g) | 12,28 | 10,9 | 12,76 | 10,54 | 13,1 | 10,55 |
| U de Mf (%) | 6,0 | 9,7 | 5,1 | 5,5 | 8,4 | 3,9 |
| Mp (g) | 2,50 | 1,89 | 5,15 | 4,86 | 7,85 | 7,23 |
| U de Mp (%) | 16 | 13 | 18 | 16 | 6,5 | 4,1 |
| It (Ns) | 1,69 | 1,35 | 3,84 | 3,81 | 5,6 | 5,72 |
| U de It (%) | 22 | 11 | 13 | 16 | 25 | 9,7 |
| Emed (N) | 2,85 | 3,98 | 3,3 | 3,94 | 3,10 | 3,96 |
| U de Emed (%) | 18 | 15 | 37 | 13 | 24 | 11 |
| tq (s) | 0,59 | 0,341 | 1,16 | 0,97 | 1,79 | 1,44 |
| U de tq (%) | 17 | 19 | 25 | 21 | 1,5 | 11 |
| Is (s) | 68,9 | 73,1 | 76 | 80,1 | 72 | 80,6 |
| U de Is (%) | 8,3 | 7,2 | 21 | 7,4 | 21 | 6,9 |
| Emax (N) | 4,8 | 6,8 | 7 | 7,4 | 4,3 | 7,6 |
| U de Emax (%) | 27 | 18 | 139 | 29 | 61 | 46 |
| fm (g/s) | 4,24 | 5,57 | 4,46 | 5,02 | 4,40 | 5,02 |
| U de fm (%) | 14 | 12 | 18 | 6,4 | 2,2 | 7,2 |
| c (m/s) | 674 | 715 | 748 | 784 | 704 | 789 |
| U de c (%) | 8,3 | 7,3 | 21 | 7,3 | 21 | 6,9 |
| Δ Emed2 (N) | 0,30 | 0,40 | 0,77 | 0,32 | 0,33 | 0,25 |
| Δ Emed2 (%) | 11 | 10 | 23 | 8,1 | 11 | 6,3 |
| Número de falhas | 0 | 0 | 1 | 0 | 2 | 1 |
| It atende NFPA 1125? | Não | Sim | Sim | Sim | Não | Sim |
| Δ Emed2 atende NFPA 1125? | Sim | Sim | Sim | Sim | Sim | Sim |
| Classe segundo testes UFPR | A3 | A4 | B3 | B4 | C3 | C4 |

A Tabela 7 faz uma comparação entre os três tipos de motores BT (A6, B6 e C6) de dois lotes de fabricação diferentes (Out/2008 e Jul/2009). O objetivo é verificar o efeito sobre o desempenho dos motores causado por lotes de fabricação diferentes, ou seja, verificar a qualidade do processo de fabricação destes motores. A Tabela 7 resume as informações já mostradas nas Tabelas 2, 5 e 6 deste relatório e daquele (Marchi, 2009) referente aos testes de 2008. Pode-se observar que:

- 1) Todos os parâmetros variaram, exceto De.
- 2) Lt, Mo, Mf, Mp e tq são menores no lote de 2009.
- 3) Emed, Is, Emax, fm e c são maiores no lote de 2009.

- 4) Mantiveram seus valores quase constantes: It e as suas incertezas.
- 5) As incertezas de Emed, Is, Emax e c são menores no lote de 2009.
- 6) O número de falhas dos motores passou de três em 2008 para apenas uma em 2009.
- 7) Dois tipos de motores (A6 e C6) de 2008 não atendiam a dois critérios de certificação da norma NFPA 1125. Os três tipos de motores de 2009 atendem a estes dois critérios.
- 8) Os motores de 2008 são diferentes dos de 2009.
- 9) A qualidade dos motores de 2009 é melhor do que as de 2008.

5 CONCLUSÃO

Com base nos 18 testes estáticos relatados neste trabalho, verificou-se que:

- 1) As incertezas (U) de De e Lt podem chegar a 2,3%.
- 2) As incertezas de Mo e Mf podem chegar a 9,7%, e as de Mp a 16%.
- 3) O empuxo médio de todos os motores testados é 3,96 N, ou 4 N ao se arredondar Emed para um número inteiro. Sua incerteza pode chegar a 15%.
- 4) São quase constantes em todos os motores: Is (78 s); fm (5,2 g/s); e c (760 m/s). Suas incertezas podem chegar a 12%.
- 5) O tempo de queima (tq) e o impulso total (It) são quase lineares com a massa de propelente (Mp). Suas incertezas podem chegar a 21%.
- 6) As incertezas de Emax ficam entre 18 e 46%.
- 7) O grão-propelente é quase de geometria cilíndrica, sem perfuração, com queima do tipo cigarro.
- 8) O fabricante denota seus motores como A6, B6 e C6. Porém, de acordo com os testes realizados, eles deveriam ser classificados como A4, B4 e C4.
- 9) Os motores BT são da mesma qualidade de fabricantes dos Estados Unidos em relação aos parâmetros avaliados (It, tq, Emax, Is e $\Delta Emed2$), e atendem a dois requisitos da norma NFPA 1125 (2007).
- 10) Os motores fabricados em 2008 são diferentes dos de 2009. A qualidade dos motores de 2009, cujos resultados são apresentados neste relatório, é melhor do que a dos motores de 2008.

Agradecimentos

Ao sr José Roberto de Andrade, proprietário da Bandeirante (Boa Vista Modelismo Ltda.), pelo fornecimento dos motores, sob encomenda, na forma de *boosters*.

À profa. Ana Sofia C. M. D'Oliveira, que permitiu utilizar a balança Gehaka.

Ao prof. Luciano K. Araki, que auxiliou nos testes, realizando a ignição dos motores.

Ao prof. Marcos C. Campos, que disponibilizou o sistema de aquisição de dados da HBM, forneceu o banco estático usado e permitiu utilizar o laboratório que coordena para a realização dos testes estáticos.

Ao técnico José Osmar Klein Júnior e ao engenheiro Alexandre Stall pelo auxílio na instalação e uso da nova versão do *software* Catman 4.5 da HBM.

Ao MCT/CNPq (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico, do Brasil) pelo apoio financeiro. O autor é bolsista do CNPq.

REFERÊNCIAS

ABNT. **Guia para expressão da incerteza de medição**. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas, 1997.

BROWN, C. D. **Spacecraft propulsion**. Washington: AIAA, 1996.

<ftp://ftp.demec.ufpr.br/foguete/> (2009).

JHT. **ASME Journal of Heat Transfer policy on reporting uncertainties in experimental measurements and results**, v. 115, p. 5-6, 1993.

KREYSZIG, E. **Advanced engineering mathematics**. 8 ed. New York: Wiley, 1999.

MARCHI, C. H. **Testes estáticos de 27 Nov 2008 de motores-foguete do tipo BT (Bandeirante) de espaçomodelos**. Curitiba: Universidade Federal do Paraná, 2009. 31 p.

NAR. **United States Model Rocketry Sporting Code**. National Association of Rocketry, 2004. p. 2.

NFPA. **NFPA 1125 Code for the manufacture of model rocket and high power rocket motors**. Quincy, MA, United States of America: National Fire Protection Association, 2007.

www.nar.org (2009).

www.thrustcurve.org (2009).

APÊNDICE A – curvas de empuxo x tempo

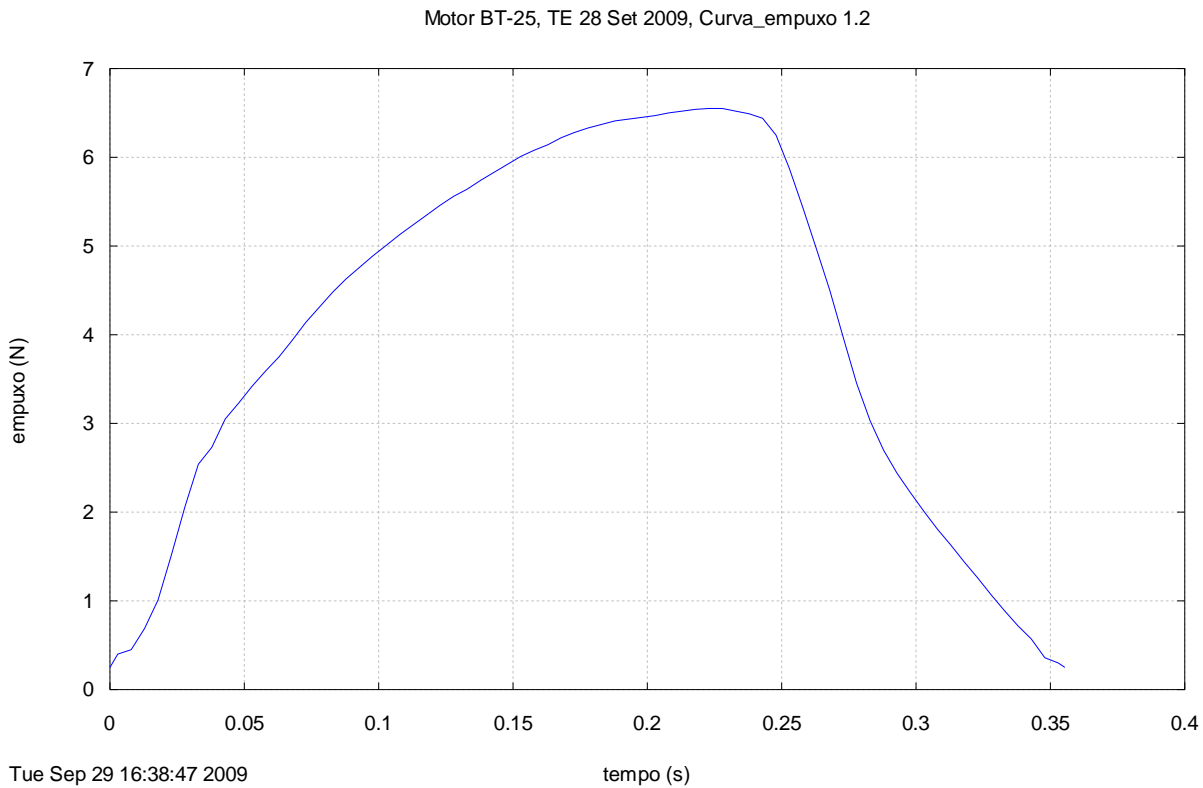


Figura A1. Curva empuxo *versus* tempo processada do motor-foguete BT-25.

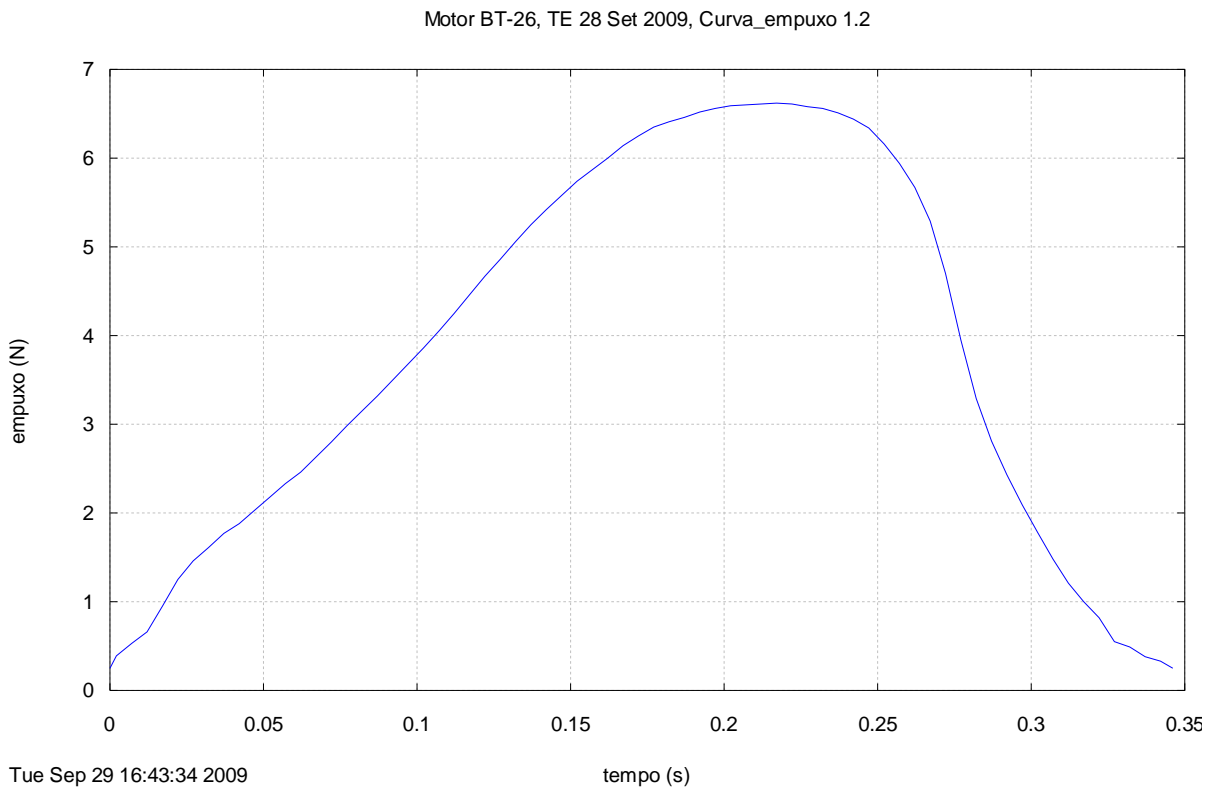


Figura A2. Curva empuxo *versus* tempo processada do motor-foguete BT-26.

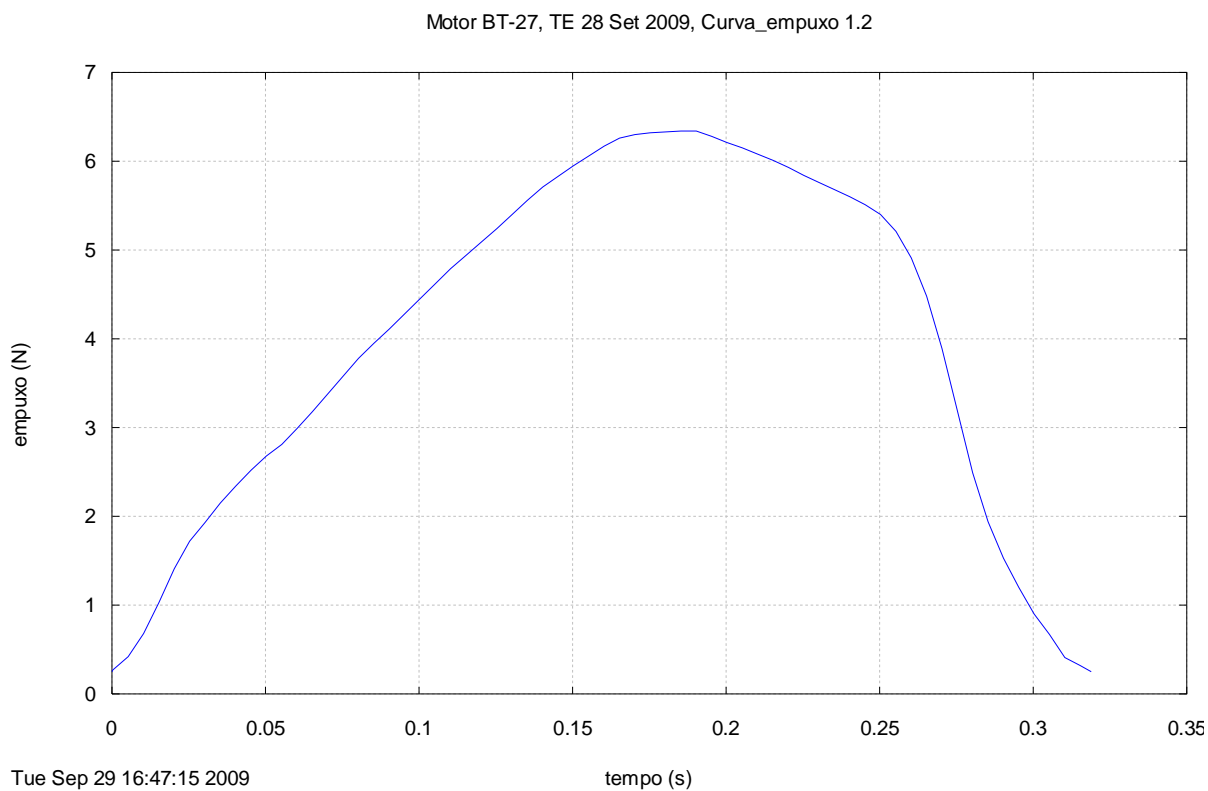


Figura A3. Curva empuxo *versus* tempo processada do motor-foguete BT-27.

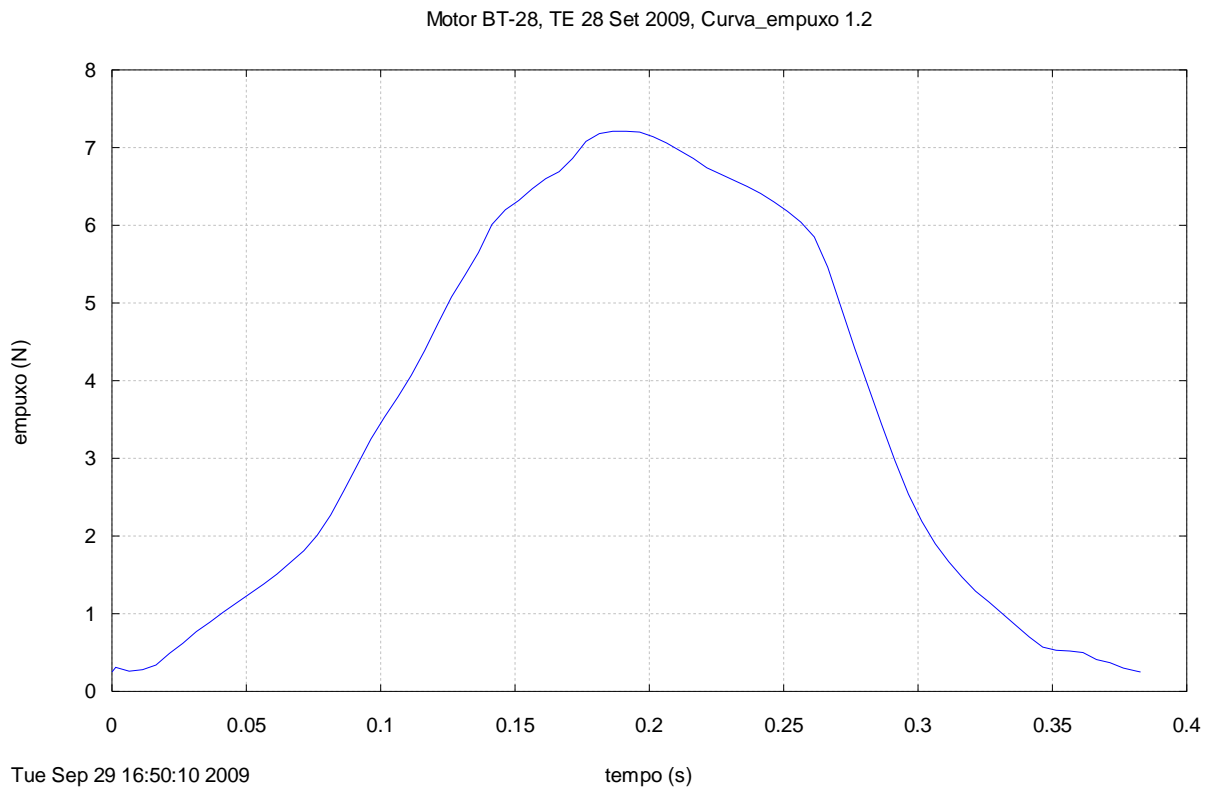


Figura A4. Curva empuxo *versus* tempo processada do motor-foguete BT-28.

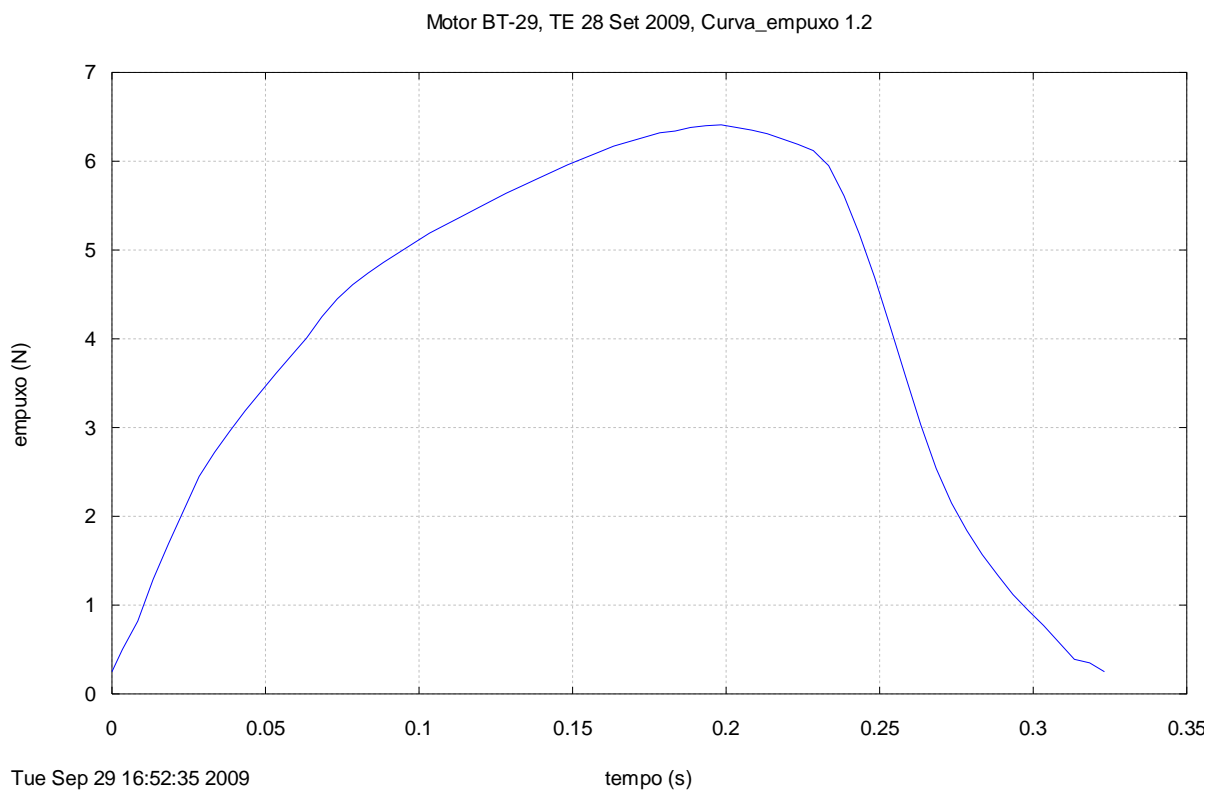


Figura A5. Curva empuxo *versus* tempo processada do motor-foguete BT-29.

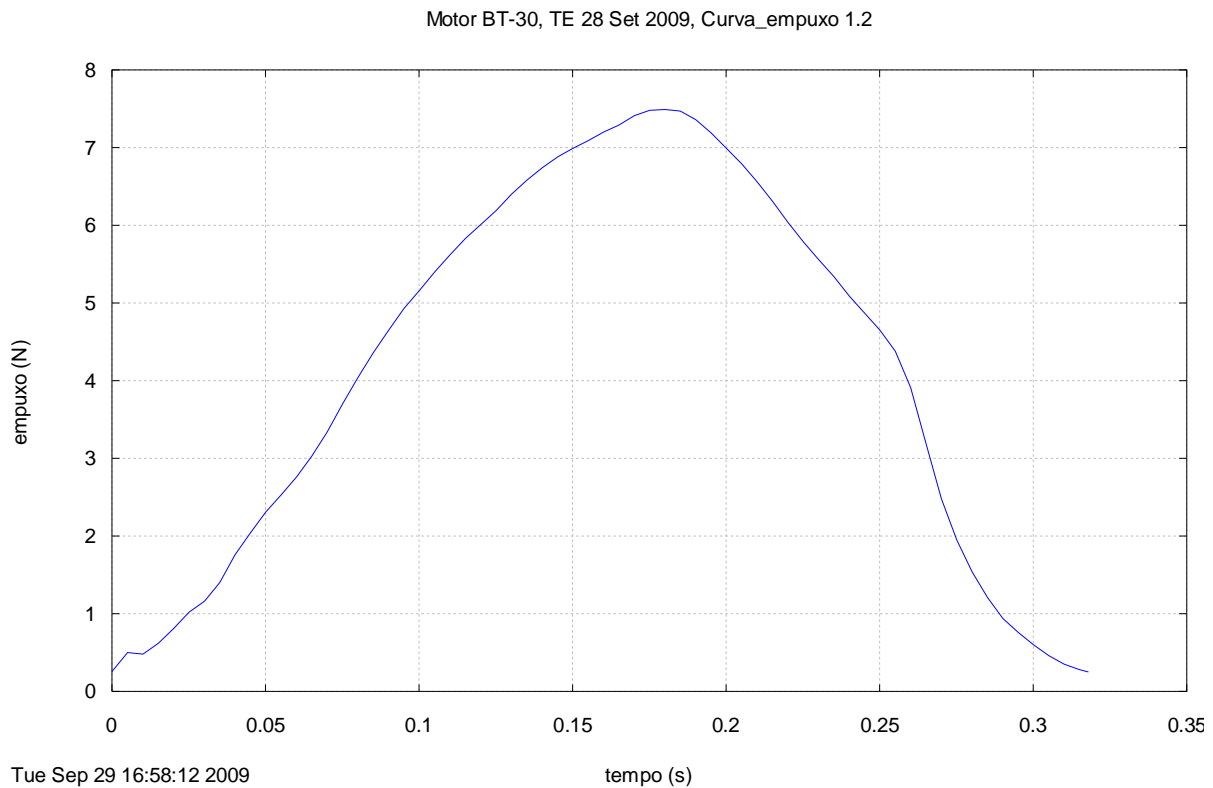


Figura A6. Curva empuxo *versus* tempo processada do motor-foguete BT-30.

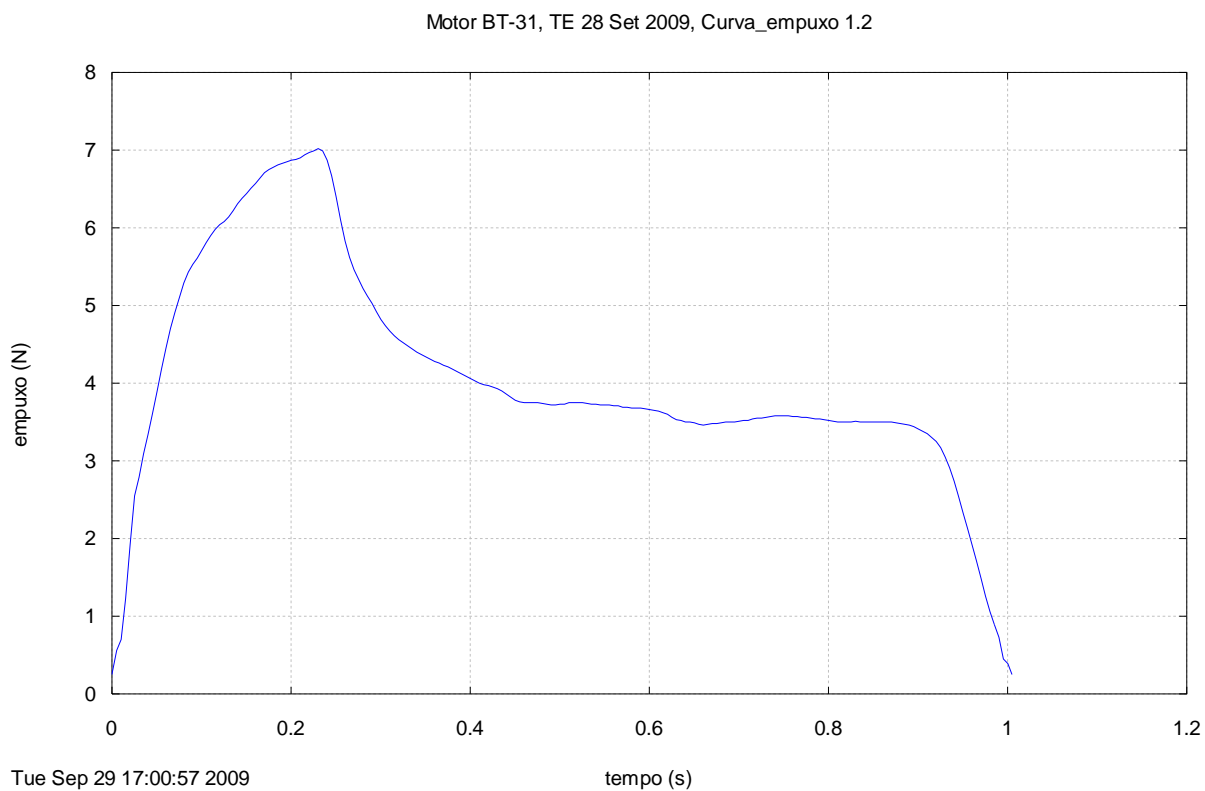


Figura A7. Curva empuxo *versus* tempo processada do motor-foguete BT-31.

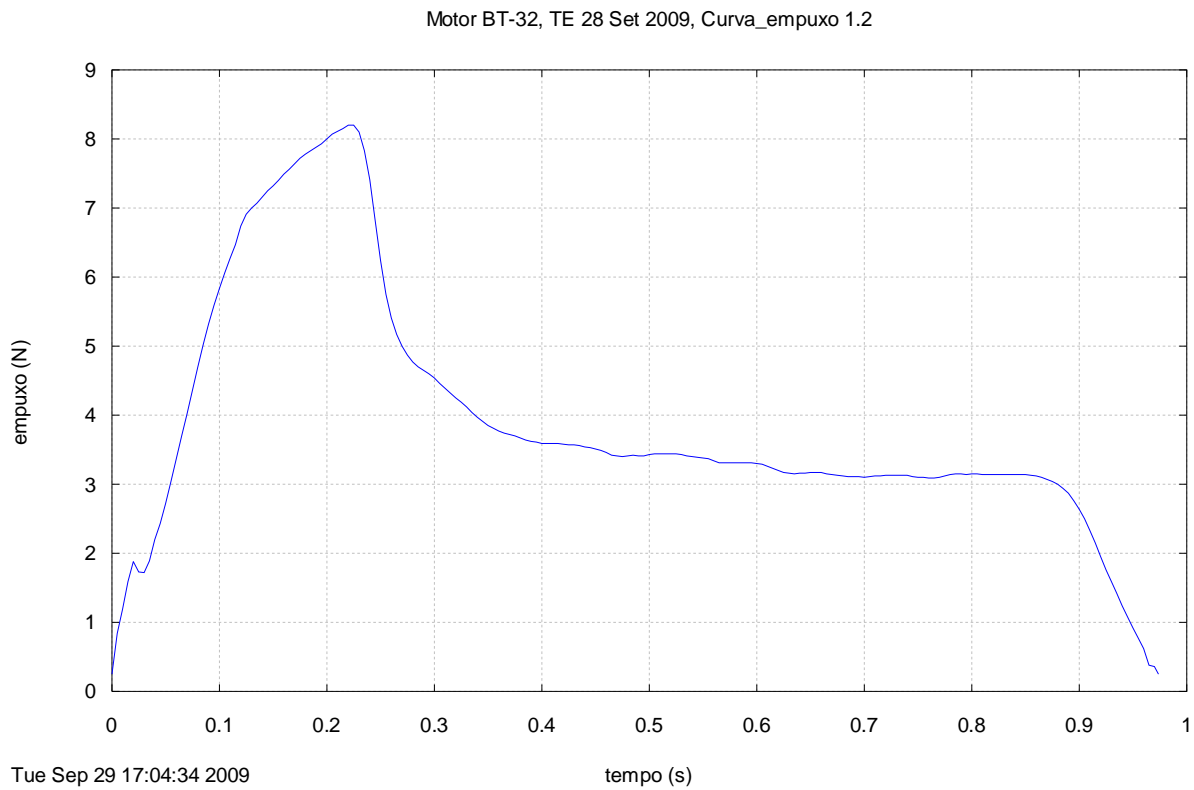


Figura A8. Curva empuxo *versus* tempo processada do motor-foguete BT-32.

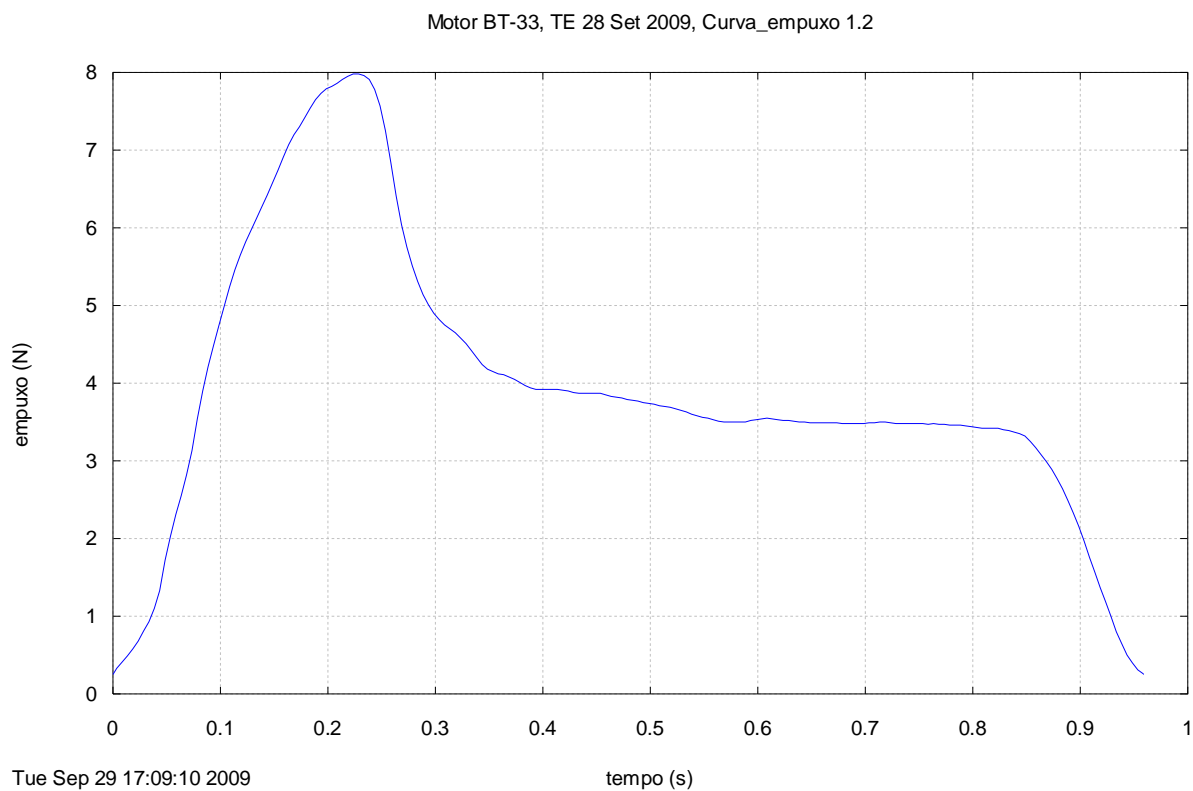


Figura A9. Curva empuxo *versus* tempo processada do motor-foguete BT-33.

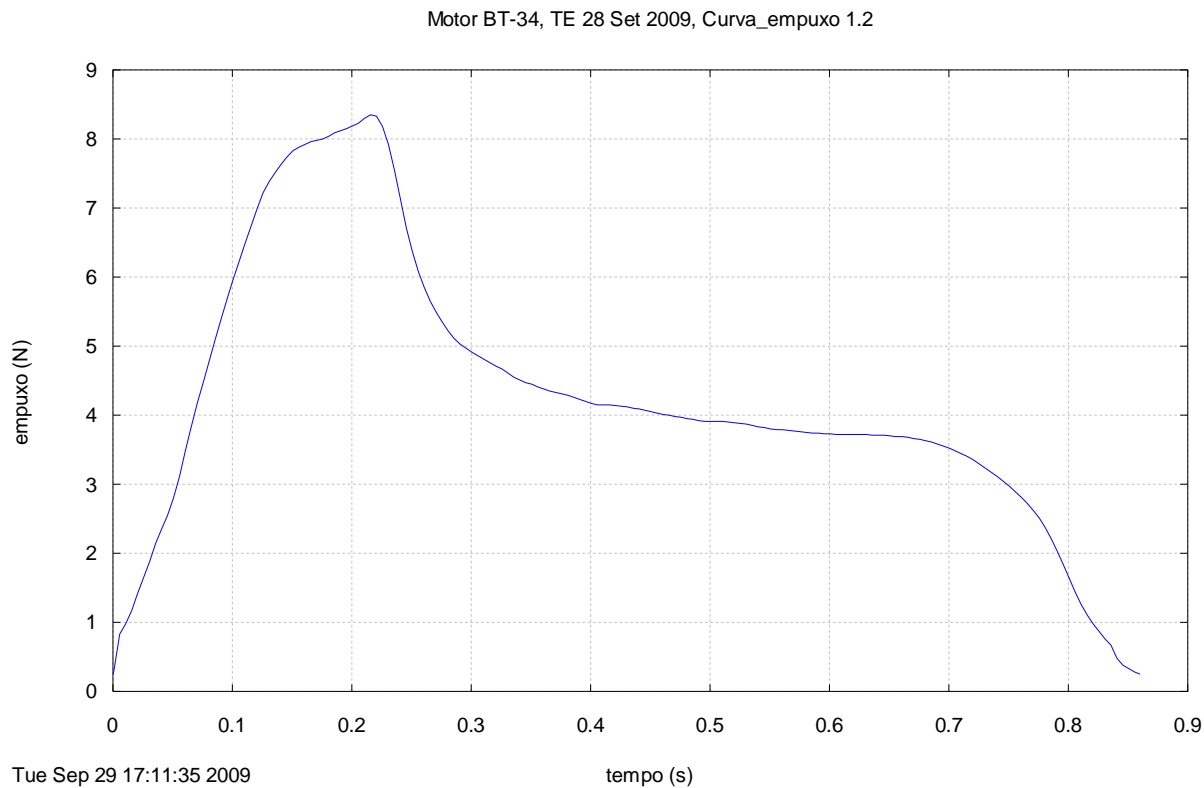


Figura A10. Curva empuxo *versus* tempo processada do motor-foguete BT-34.

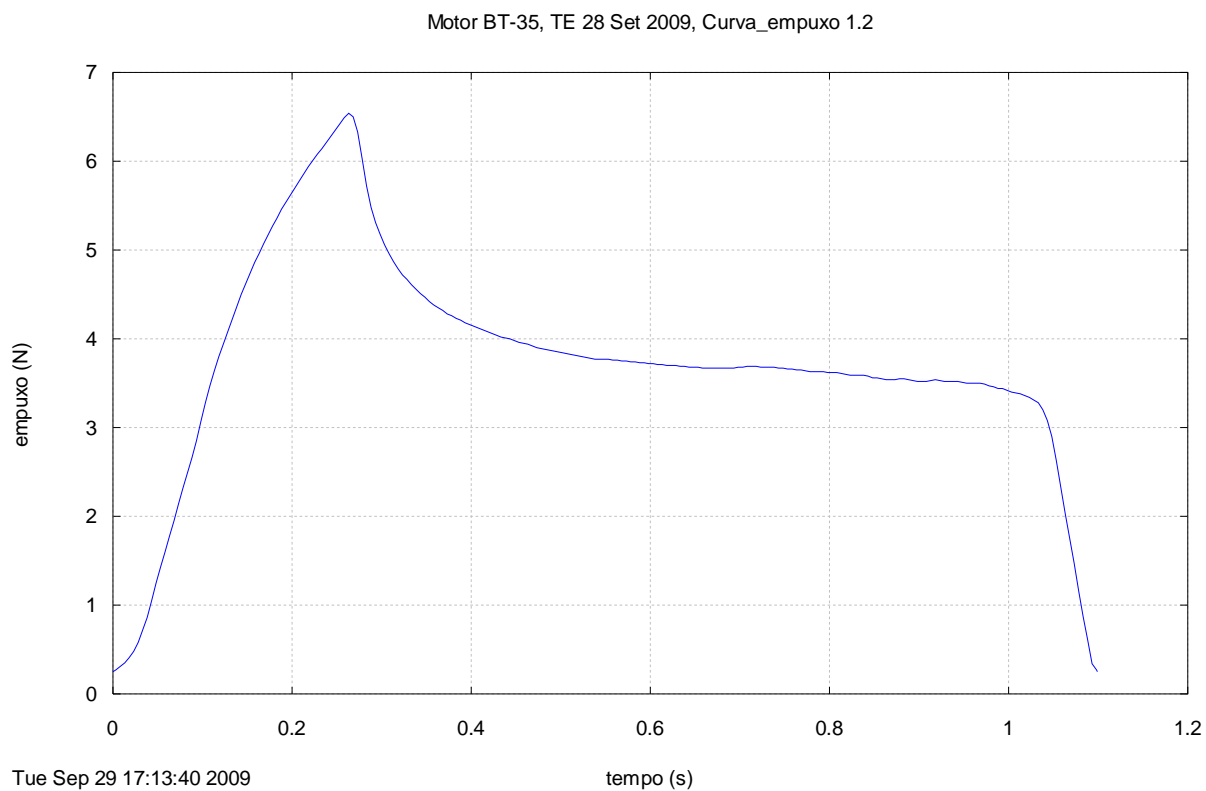


Figura A11. Curva empuxo versus tempo processada do motor-foguete BT-35.

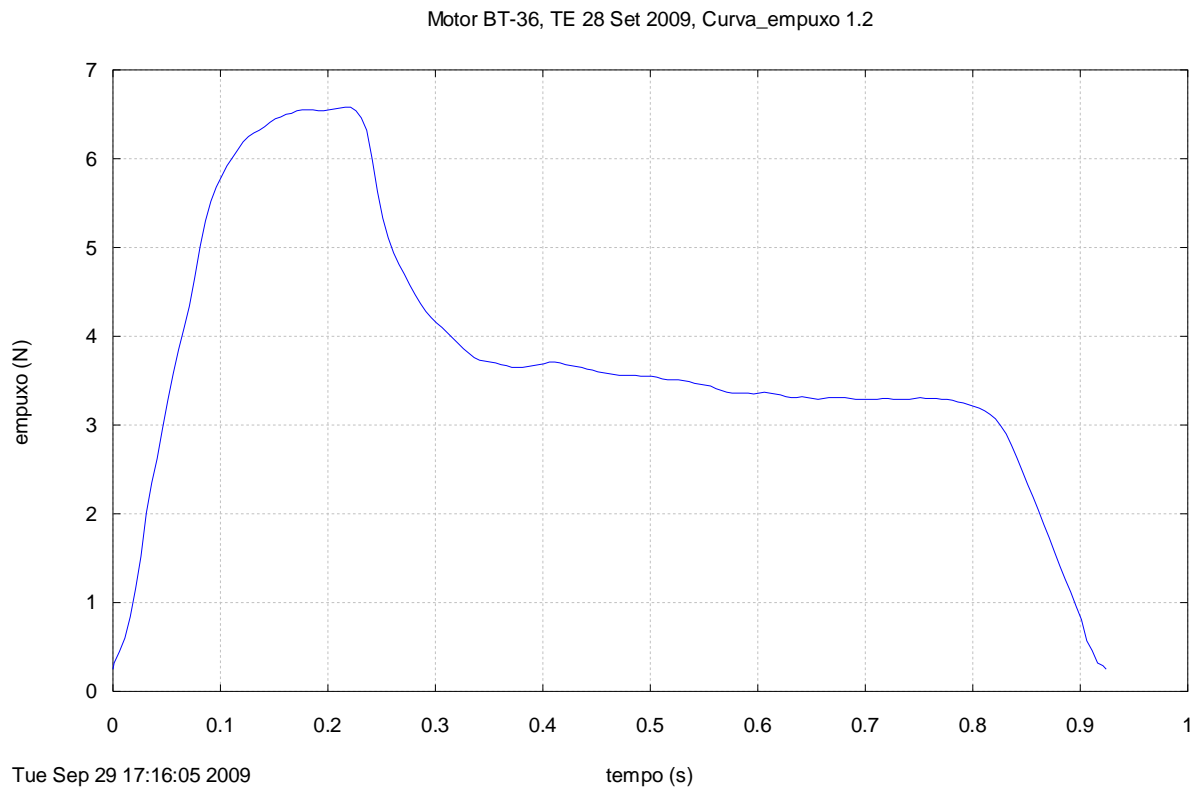


Figura A12. Curva empuxo versus tempo processada do motor-foguete BT-36.

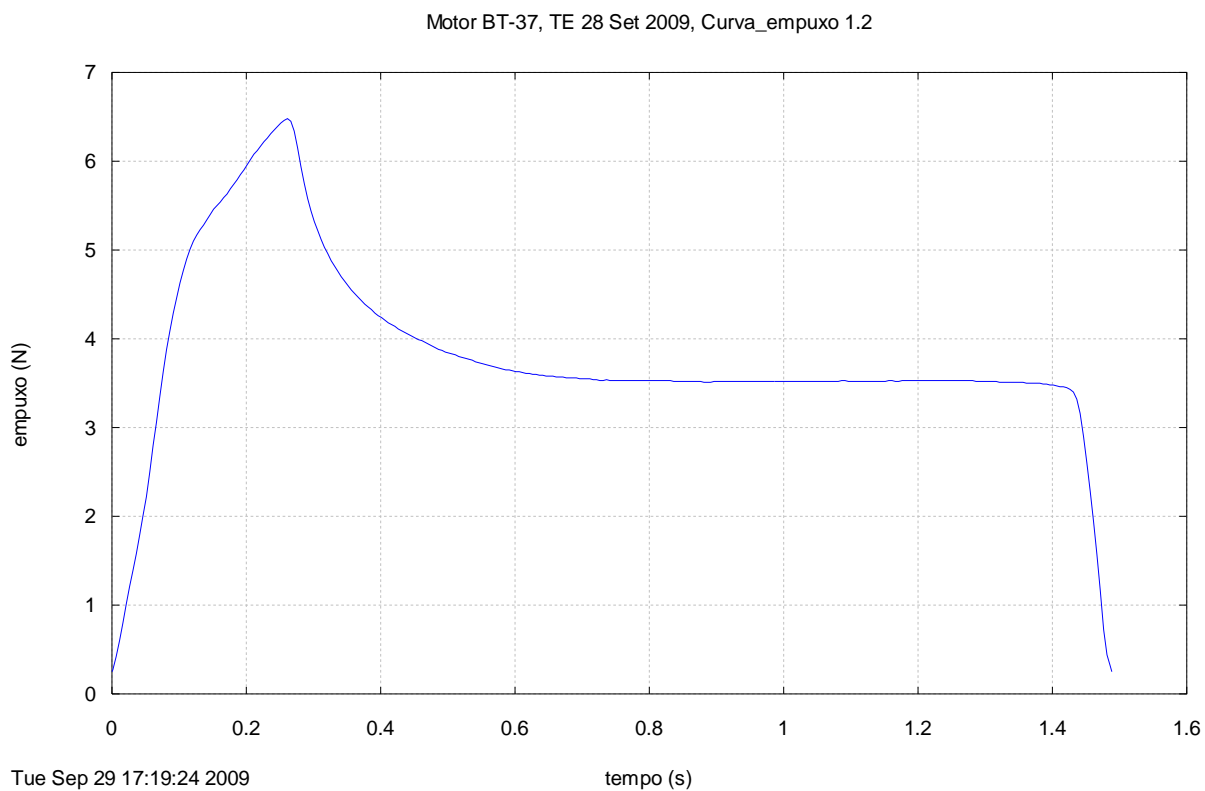


Figura A13. Curva empuxo versus tempo processada do motor-foguete BT-37.

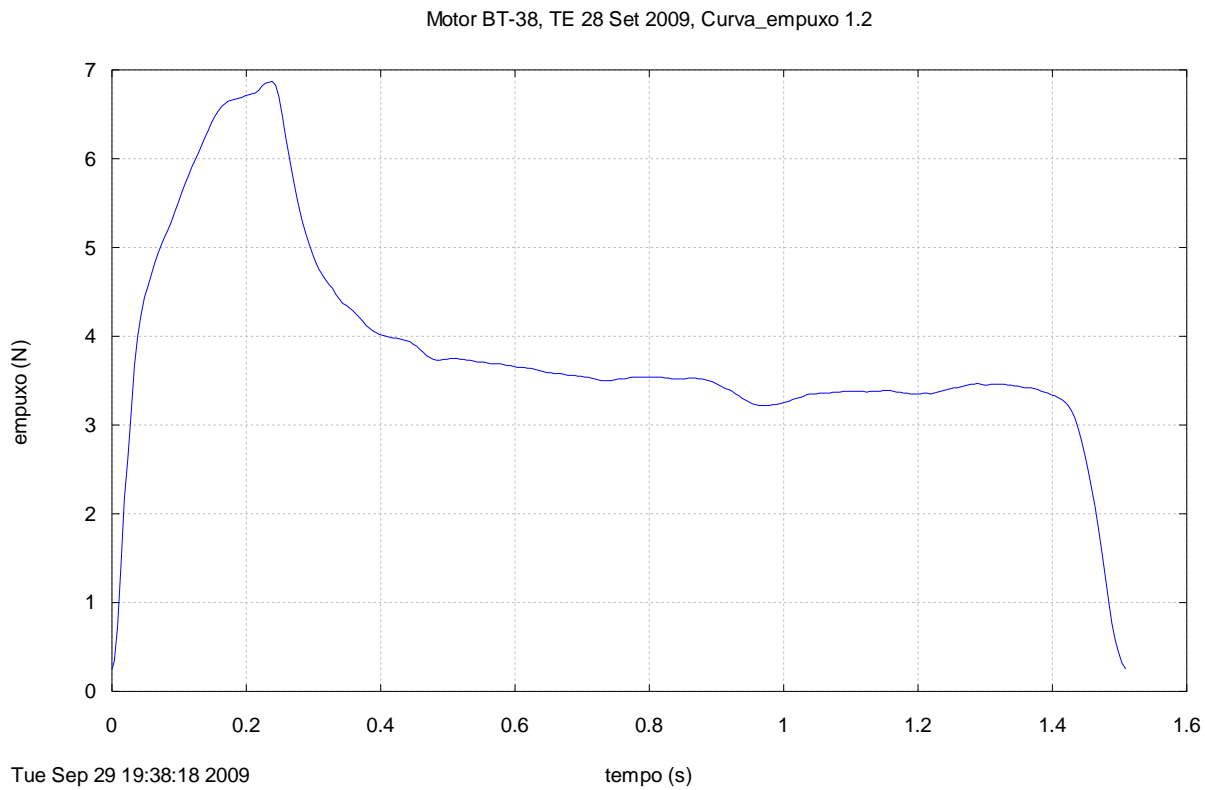


Figura A14. Curva empuxo versus tempo processada do motor-foguete BT-38.

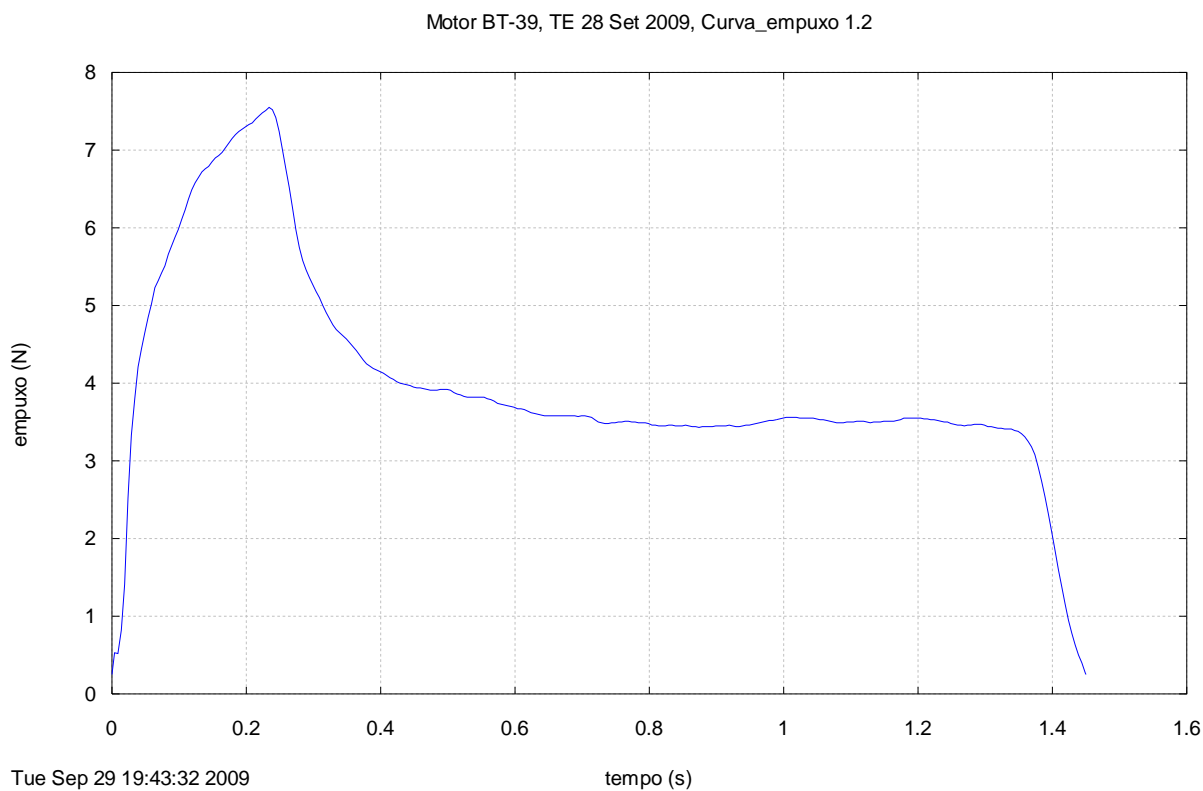


Figura A15. Curva empuxo versus tempo processada do motor-foguete BT-39.

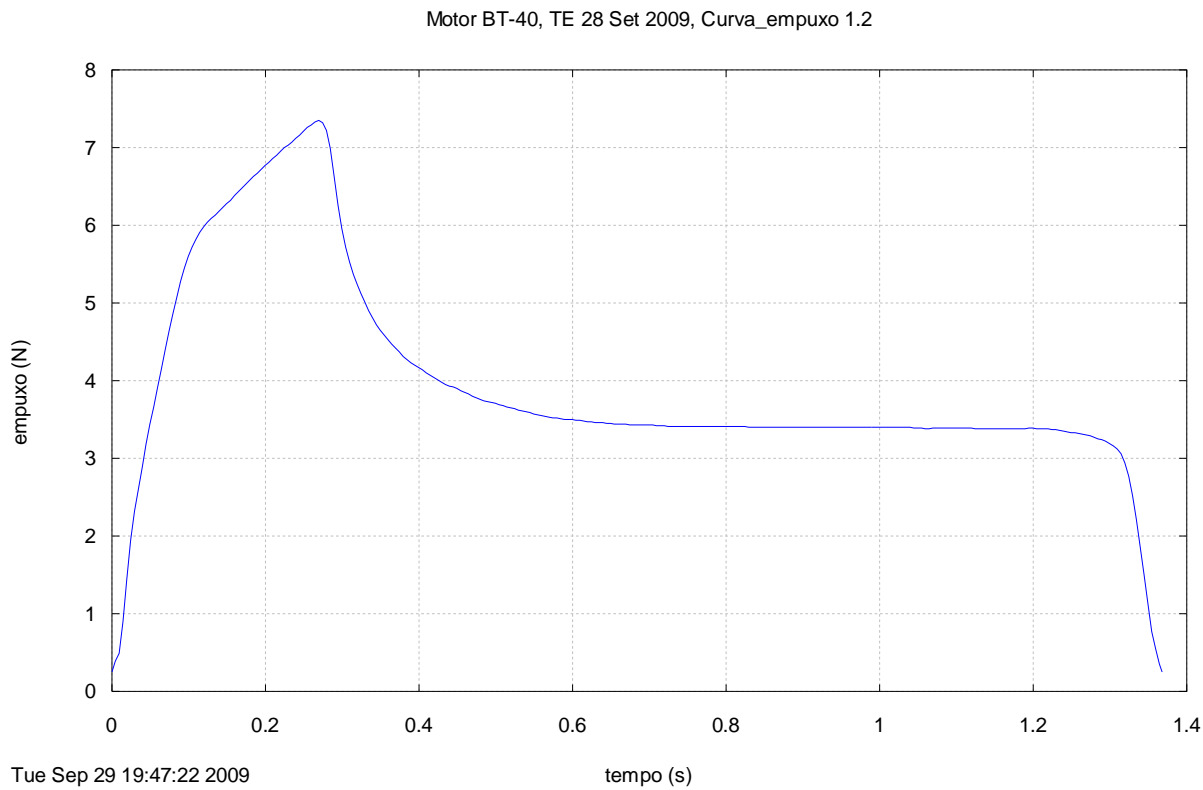


Figura A16. Curva empuxo versus tempo processada do motor-foguete BT-40.

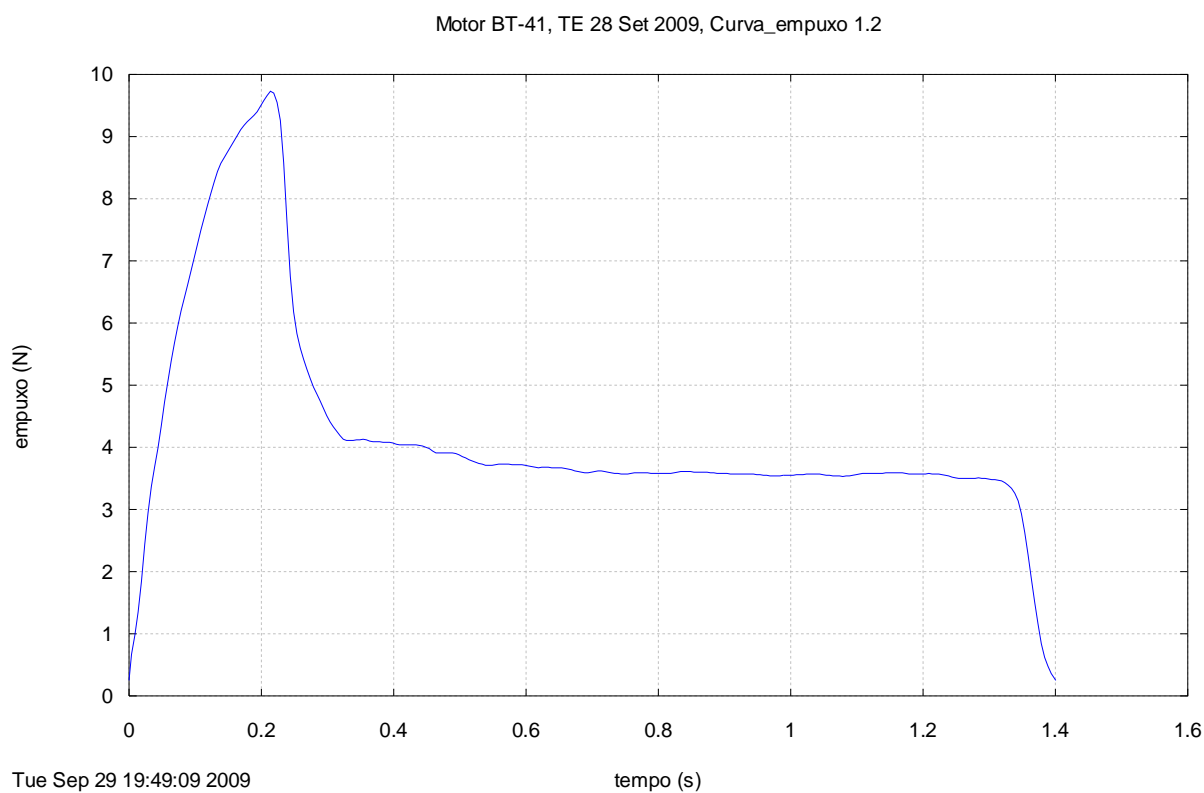


Figura A17. Curva empuxo versus tempo processada do motor-foguete BT-41.

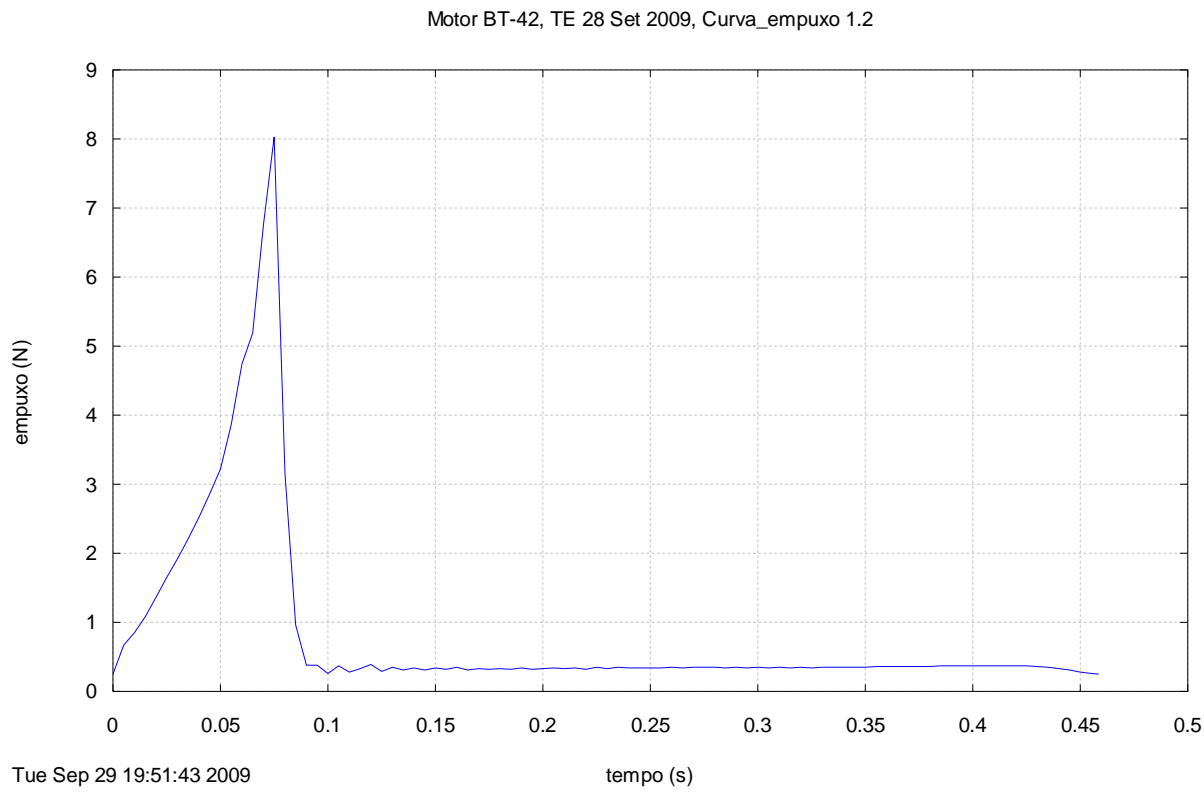


Figura A18. Curva empuxo versus tempo processada do motor-foguete BT-42.

APÊNDICE B – Listagem do aplicativo Curva_Empuxo 1.2

```

Program curva_empuxo_lp2

! Processamento de curvas de empuxo experimentais

! Carlos H. Marchi
! DEMEC/UFPR, Curitiba, PR
! versão 1.0: 11 Set 06
! versão 1.1: 28 Nov 06
! versão 1.2: 9 Nov 08
! última alteração: 9 Nov 08

! Precisão dupla
! Linguagem Fortran
! Aplicativo usado: Compaq Fortran 6.6
! Tipo de projeto: Console Application

! -----

! *** DEFINE AS VARIÁVEIS DO PROGRAMA ***

use portlib ! inserção da biblioteca básica do Fortran

implicit none

real*8 :: Emax, g, ta, t, tmax, Ea, E, Emin, M, &
         fator, t0, tf, tq, razao, It, c, Emed, Is, fm

integer :: ver, flag, fim, io, i

character*4 :: classe
character*50 :: original, dados, caso, nome2
character*70 :: titulo

! -----

! *** LÊ OS DADOS ***

! Mostra o conteúdo do arquivo de dados geral do programa
ver = system("Notepad curva_empuxo_lp2_dados_geral.txt")

! Lê o nome do arquivo com os dados numéricos
open(8,file="curva_empuxo_lp2_dados_geral.txt")
read(8,*) dados
close(8)

! Mostra o conteúdo do arquivo com os dados numéricos
ver = system('notepad '//dados)

! Lê os dados numéricos

open(8,file=dados)

read(8,*) original
read(8,*) Emin
read(8,*) M
read(8,*) g
read(8,*) caso
read(8,*) titulo

close(8)

! -----

! *** INICIALIZA VARIÁVEIS E CONSTANTES

flag = 0
Emax = 0.0d0
nome2 = "curva_empuxo_lp2_dados_grafico.txt"

! -----

! *** CRIA O ARQUIVO DE SAÍDA ***

open(10,file=caso)

```

```

! -----
! *** ESCREVE OS DADOS NO ARQUIVO DE SAÍDA ***
write(10,1) trim(adjustl(caso)), trim(adjustl(titulo))

1 format(/,1x, 'Saída do programa CURVA_EMPUXO 1.2, versão de 9 Nov 2008',//, &
      1x, 'Caso   = ', a, //, &
      1x, 'Título = ', a )

! -----
! *** determinação do empuxo máximo ***
open(8,file=trim(adjustl(original)))

do while ( flag == 0 )

    read(8,*,iostat=io) t, E

    if ( E >= Emax ) then
        Emax = E
        tmax = t
    end if

    if ( io < 0 ) flag = 1

end do

close(8)

fator = 100 * Emin / Emax

! -----
! *** geração da curva de empuxo corrigida ***

ta      = 0.0d0
Ea      = 0.0d0
flag    = 0
fim     = 0
t0      = 1.0d+3
It      = 0.0d0

open(8,file=trim(adjustl(original)))
open(9,file=trim(adjustl(nome2)))

write(10,11)
11 format(/,5x,'*** CURVA EMPUXO X TEMPO ***',//, &
      t3,'t (s)', t13,'empuxo (N)')

write(9,12)
12 format('#', t3,'t (s)', t13,'empuxo (N)')

write( 9,15) 0.0d0, Emin
write(10,15) 0.0d0, Emin

15 format ( f8.4, f8.2 )

do while ( flag == 0 )

    read(8,*) t, E

    if ( E >= Emin .and. Ea < Emin ) then
        t0 = ta + (t-ta)*(Emin-Ea)/(E-Ea)
        fim = 1
    end if

    if ( E <= Emin .and. Ea > Emin .and. fim == 1 ) then
        tf = ta + (t-ta)*(Emin-Ea)/(E-Ea)
        flag = 1
    end if

    if ( t > t0 .and. flag == 0 ) then
        write( 9,15) t-t0, E
        write(10,15) t-t0, E
        if ( t > t0 .and. ta < t0 ) then
            It = It + (E+Emin)*(t-t0)/2
        else

```

```

        It = It + (E+Ea)*(t-ta)/2
    end if
end if

    ta = t
    Ea = E

end do

close(8)

write( 9,15) tf-t0, Emin
write(10,15) tf-t0, Emin

close(9)

It = It + (Emin+Ea)*(tf-ta)/2

tq = tf - t0

Emed = It / tq

c = It / M

Is = c / g

fm = 1000 * M / tq

razao = Emax / Emed

if ( 0.0000d0 < It .and. It <= 0.3125d0 ) classe = '1/8A'
if ( 0.3125d0 < It .and. It <= 0.6250d0 ) classe = '1/4A'
if ( 0.6250d0 < It .and. It <= 1.2500d0 ) classe = '1/2A'
if ( 1.2500d0 < It .and. It <= 2.5000d0 ) classe = 'A'
if ( 2.5000d0 < It .and. It <= 5.0000d0 ) classe = 'B'
if ( 5.0000d0 < It .and. It <= 10.0000d0 ) classe = 'C'
if ( 10.0000d0 < It .and. It <= 20.0000d0 ) classe = 'D'
if ( 20.0000d0 < It .and. It <= 40.0000d0 ) classe = 'E'
if ( 40.0000d0 < It .and. It <= 80.0000d0 ) classe = 'F'
if ( 80.0000d0 < It .and. It <= 160.0000d0 ) classe = 'G'
if ( 160.0000d0 < It .and. It <= 320.0000d0 ) classe = 'H'
if ( 320.0000d0 < It .and. It <= 640.0000d0 ) classe = 'I'

write(10,20) trim(adjustl(titulo)), M*1000, g, Emin, Emax, tmax, &
            tmax-t0, t0, tf, tq, It, Emed, c, Is, fm, razao, &
            fator, trim(adjustl(classe)), idnint(Emed)

20 format(/, " *** ", a, " ***", &
        //, f7.2, " = massa de propelente (g)", &
        //, f9.4, " = aceleração gravitacional local (m/s2)", &
        //, f7.2, " = empuxo mínimo (N)", &
        //, f7.2, " = empuxo máximo (N)", &
        //, f8.3, " = tempo original do empuxo máximo (s)", &
        //, f8.3, " = tempo corrigido do empuxo máximo (s)", &
        //, f8.3, " = tempo original inicial (s)", &
        //, f8.3, " = tempo original final (s)", &
        //, f8.3, " = tempo de queima (s)", &
        //, f7.2, " = impulso total (Ns)", &
        //, f7.2, " = empuxo médio (N)", &
        //, f6.1, " = velocidade de exaustão efetiva média (m/s)", &
        //, f6.1, " = impulso específico médio (s)", &
        //, f7.2, " = fluxo de massa médio (g/s)", &
        //, f7.2, " = razão empuxo máximo / empuxo médio", &
        //, f7.2, " = razão empuxo mínimo / empuxo máximo (%)", &
        //, "classificação do motor = ", a, i2 )

close(10)

! -----

! *** gera o gráfico da curva de empuxo ***

open(18,file="curva_empuxo_lp2.gnu")

do i = 1, 6
    read(18,*)
end do

write(18,31) trim(adjustl(titulo))
31 format("set title '", a, "'")

```

```
write(18,30) trim(adjustl(nome2))
30 format("plot '", a, "' notitle")

close(18)

ver = system("Wgnuplot curva_empuxo_lp2.gnu")

! -----
! *** MOSTRA O CONTEÚDO DO ARQUIVO DE SAÍDA ***
ver = system("Notepad " // trim(adjustl(caso)))
! -----

end program curva_empuxo_lp2
```

APÊNDICE C – Dados para o aplicativo Curva_Empuxo 1.2 e motor BT-25

```
'bt25.txt'                original = Nome do arquivo de dados originais de empuxo versus tempo
  0.25d-0 ..... Emin     = Empuxo mínimo para definir o início e fim da curva (N)
  2.037d-3 ..... M       = Massa de propelente (kg)
  9.7876d0 ..... g       = Aceleração gravitacional local (m/s2)
'curva_empuxo_lp2_BT-25_saida.txt' ..... caso = nome do arquivo de saída
'Motor BT-25, TE 28 Set 2009, Curva_empuxo 1.2' ! titulo = título de identificação da análise
```

APÊNDICE D – Resultados do aplicativo Curva_Empuxo 1.2 para o motor BT-25

Saída do programa CURVA_EMPUXO 1.2, versão de 9 Nov 2008

Caso = curva_empuxo_lp2_BT-25_saida.txt

Título = Motor BT-25, TE 28 Set 2009, Curva_empuxo 1.2

*** CURVA EMPUXO X TEMPO ***

| t (s) | empuxo (N) |
|--------|------------|
| 0.0000 | 0.25 |
| 0.0029 | 0.40 |
| 0.0079 | 0.45 |
| 0.0129 | 0.69 |
| 0.0179 | 1.01 |
| 0.0229 | 1.52 |
| 0.0279 | 2.06 |
| 0.0329 | 2.54 |
| 0.0379 | 2.73 |
| 0.0429 | 3.05 |
| 0.0479 | 3.23 |
| 0.0529 | 3.42 |
| 0.0579 | 3.59 |
| 0.0629 | 3.75 |
| 0.0679 | 3.94 |
| 0.0729 | 4.14 |
| 0.0779 | 4.31 |
| 0.0829 | 4.48 |
| 0.0879 | 4.63 |
| 0.0929 | 4.76 |
| 0.0979 | 4.89 |
| 0.1029 | 5.01 |
| 0.1079 | 5.13 |
| 0.1129 | 5.24 |
| 0.1179 | 5.35 |
| 0.1229 | 5.46 |
| 0.1279 | 5.56 |
| 0.1329 | 5.64 |
| 0.1379 | 5.74 |
| 0.1429 | 5.83 |
| 0.1479 | 5.92 |
| 0.1529 | 6.01 |
| 0.1579 | 6.08 |
| 0.1629 | 6.14 |
| 0.1679 | 6.22 |
| 0.1729 | 6.28 |
| 0.1779 | 6.33 |
| 0.1829 | 6.37 |
| 0.1879 | 6.41 |
| 0.1929 | 6.43 |
| 0.1979 | 6.45 |
| 0.2029 | 6.47 |
| 0.2079 | 6.50 |
| 0.2129 | 6.52 |
| 0.2179 | 6.54 |
| 0.2229 | 6.55 |
| 0.2279 | 6.55 |
| 0.2329 | 6.52 |
| 0.2379 | 6.49 |
| 0.2429 | 6.44 |
| 0.2479 | 6.25 |
| 0.2529 | 5.87 |
| 0.2579 | 5.43 |
| 0.2629 | 4.97 |
| 0.2679 | 4.50 |
| 0.2729 | 3.97 |
| 0.2779 | 3.45 |
| 0.2829 | 3.03 |
| 0.2879 | 2.70 |
| 0.2929 | 2.44 |
| 0.2979 | 2.22 |
| 0.3029 | 2.01 |
| 0.3079 | 1.81 |
| 0.3129 | 1.63 |
| 0.3179 | 1.44 |
| 0.3229 | 1.26 |

| | |
|--------|------|
| 0.3279 | 1.07 |
| 0.3329 | 0.89 |
| 0.3379 | 0.72 |
| 0.3429 | 0.57 |
| 0.3479 | 0.36 |
| 0.3529 | 0.30 |
| 0.3554 | 0.25 |

*** Motor BT-25, TE 28 Set 2009, Curva_empuxo 1.2 ***

2.04 = massa de propelente (g)
9.7876 = aceleração gravitacional local (m/s²)
0.25 = empuxo mínimo (N)
6.55 = empuxo máximo (N)
6.425 = tempo original do empuxo máximo (s)
0.223 = tempo corrigido do empuxo máximo (s)
6.202 = tempo original inicial (s)
6.557 = tempo original final (s)
0.355 = tempo de queima (s)
1.46 = impulso total (Ns)
4.11 = empuxo médio (N)
717.6 = velocidade de exaustão efetiva média (m/s)
73.3 = impulso específico médio (s)
5.73 = fluxo de massa médio (g/s)
1.59 = razão empuxo máximo / empuxo médio
3.82 = razão empuxo mínimo / empuxo máximo (%)

classificação do motor = A 4