



Testes estáticos de 27 Nov 2008 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, 21 de setembro 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 27 de novembro de 2008, 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; e (2) verificar a incerteza do desempenho destes motores.

2 DESCRIÇÃO DOS MOTORES-FOGUETE

As Figuras 1 a 3 mostram seis fotos dos 18 motores-foguete testados. Estes motores foram fabricados em outubro de 2008 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-7 a BT-12 do tipo A6.

A Tabela 1 apresenta as seguintes dimensões e massas de 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 da média de três medidas, obtidas 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, 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-13 a BT-18 do tipo B6.



Figura 3. Fotos mostrando os motores-foguete BT-19 a BT-24 do tipo C6.

O motor BT-13 ejetou a sua tubeira durante a queima. Esta não foi encontrada após o teste. Devido a isso, M_f de BT-13 é menor do que o dos motores BT-14 a 18 na Tabela 1. Este valor de M_f não foi considerado na Tabela 2. Portanto, a massa de propelente (M_p) deste motor é desconhecida.

Os motores BT-20 e BT-21 ejetaram a tampa de fechamento durante a queima. Estas tampas foram encontradas e juntadas aos motores após os testes para obter Mp. Porém, é possível que um pouco de massa tenha sido perdida. A ejeção das tampas de alguma forma comprometeu a aquisição dos resultados do empuxo. Devido a isso, estes resultados foram descartados.

Tabela 1. Dimensões e massas de cada motor-foguete.

Classe	Motor	De (mm)	Lt (mm)	Mo (g)	Mf (g)	Mp (g)
A6	BT-7	17,48	81,54	14,902	12,516	2,386
	BT-8	17,73	80,69	14,865	12,323	2,542
	BT-9	17,70	80,48	14,700	12,418	2,282
	BT-10	17,46	80,70	14,473	11,758	2,715
	BT-11	17,57	78,60	14,725	12,150	2,575
	BT-12	17,62	80,44	14,986	12,489	2,497
B6	BT-13	17,46	80,72	18,383	10,511	?
	BT-14	17,64	80,02	17,822	13,022	4,800
	BT-15	17,36	80,56	18,224	12,648	5,576
	BT-16	17,40	81,21	17,853	12,897	4,956
	BT-17	17,45	81,33	17,415	12,422	4,993
	BT-18	17,56	80,62	18,244	12,833	5,411
C6	BT-19	17,53	80,03	21,401	13,405	7,996
	BT-20	17,50	80,98	21,424	13,342	8,082
	BT-21	17,22	79,74	21,073	13,560	7,513
	BT-22	17,39	81,45	20,966	13,139	7,827
	BT-23	17,50	77,22	20,261	12,466	7,795
	BT-24	17,23	80,17	20,614	12,711	7,903

A Tabela 2 apresenta os valores médios e suas respectivas incertezas expandidas (U) das dimensões e massas dos motores-foguete 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 2. Valores médios e suas incertezas (U) das dimensões e massas dos motores-foguete.

Motores	BT-7 a 12	BT-13 a 18	BT-19 a 24
De (mm)	17,59	17,48	17,40
U de De (mm)	0,29	0,27	0,36
U de De (%)	1,6	1,5	2,1
Lt (mm)	80,4	80,7	79,9
U de Lt (mm)	2,5	1,2	3,8
U de Lt (%)	3,1	1,5	4,7
Mo (g)	14,78	17,99	21,0
U de Mo (g)	0,47	0,93	1,2
U de Mo (%)	3,2	5,2	5,6
Mf (g)	12,28	12,76	13,1
U de Mf (g)	0,74	0,65	1,1
U de Mf (%)	6,0	5,1	8,4
Mp (g)	2,50	5,15	7,85
U de Mp (g)	0,39	0,92	0,51
U de Mp (%)	16	18	6,5

Da Tabela 2, destaca-se o seguinte:

- 1) As incertezas de D_e ficam entre 1,5 e 2,1%, e 0,27 e 0,36 mm.
- 2) As incertezas de L_t ficam entre 1,5 e 4,7%, e 1,2 e 3,8 mm.
- 3) As incertezas de M_o e M_f ficam entre 3,2 e 8,4%, e 0,47 e 1,2 g.
- 4) As incertezas de M_p ficam entre 6,5 e 18%, e 0,39 e 0,92 g.
- 5) Em termos absolutos (g), as incertezas de M_p são do mesmo nível das incertezas absolutas de M_o e M_f . Porém, as incertezas relativas (%) de M_p são maiores porque os valores absolutos de M_p são menores do que os de M_o e M_f .

3 DESCRIÇÃO DOS TESTES ESTÁTICOS

Os 18 testes estáticos foram realizados em 27 de novembro de 2008, entre 14:09 e 15:48 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 23,2 e 24,3 °C e a pressão atmosférica entre 90,91 e 91,01 kPa. As temperaturas e pressões foram medidas com o equipamento RA123 da Oregon Venture (Figura 4).



Figura 4. Foto mostrando o medidor de temperatura e pressão usado.

Foram empregados ignitores fabricados em outubro de 2008 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, com o aplicativo computacional Catman 4.5. A célula de carga empregada foi do tipo S2, de 50 N, da HBM (Figura 6), cuja precisão básica 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.

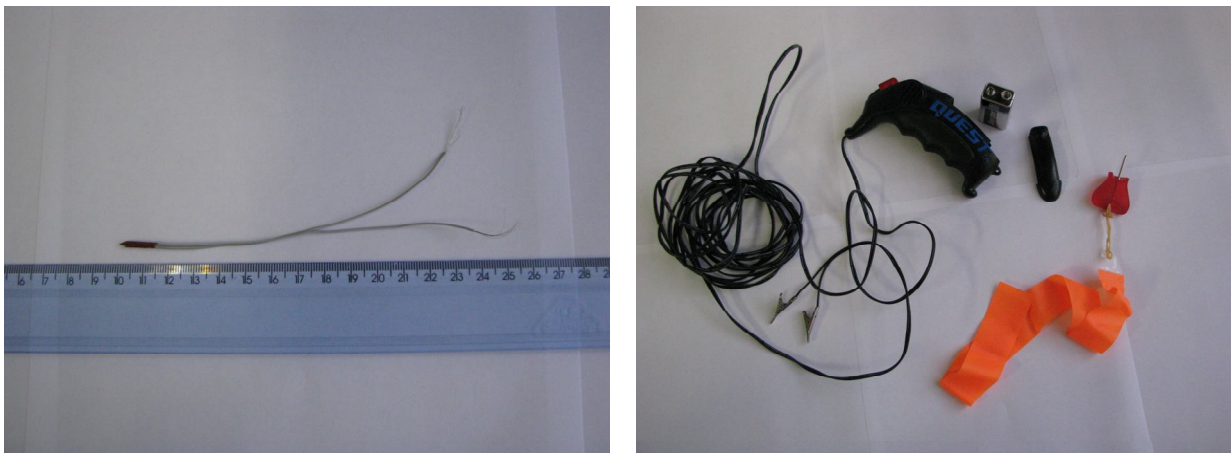


Figura 5. Fotos mostrando o ignitor e sistema de ignição usados nos testes.

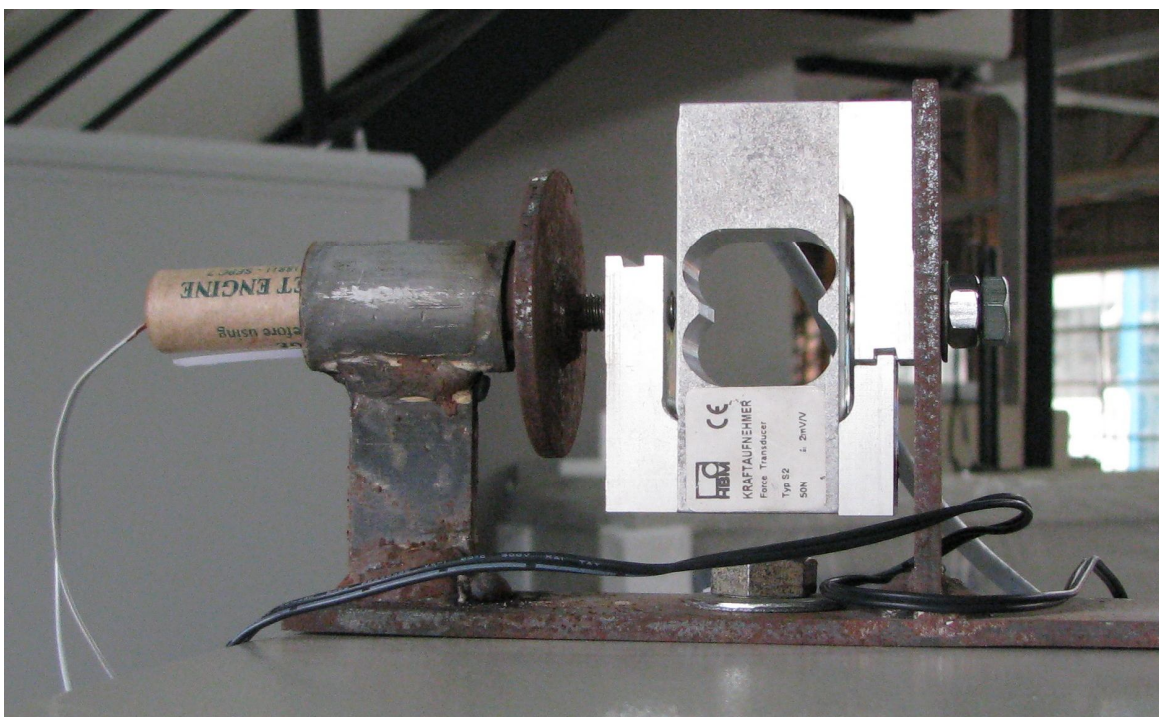


Figura 6. Foto da bancada experimental mostrando a célula de carga S2-50 da HBM e o motor BT-18 preparado para o teste estático, já com o seu ignitor.

4 RESULTADOS

As Figuras 7 a 9 mostram os motores BT-7, 14 e 24 durante seus testes estáticos, enquanto estavam queimando propelente. As imagens deste relatório foram captadas por uma câmera 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-7 durante o seu teste estático.



Figura 8. Foto mostrando o motor BT-14 durante o seu teste estático.

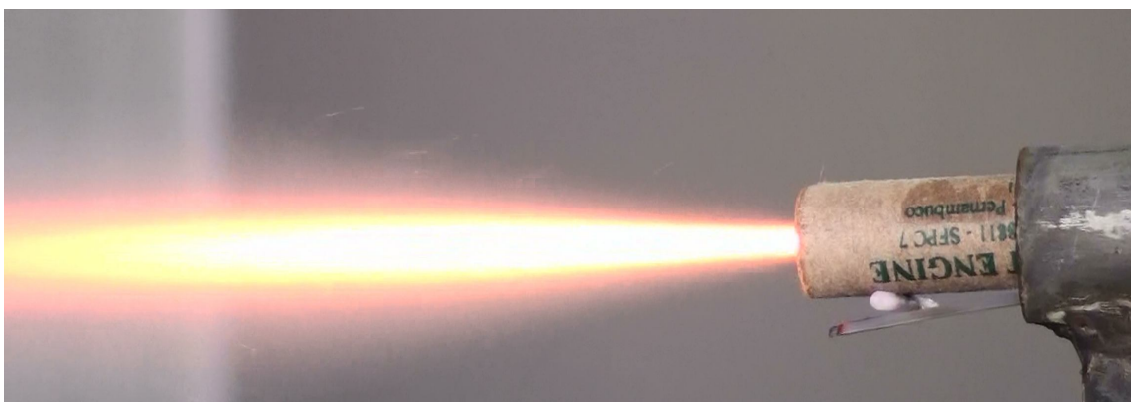


Figura 9. Foto mostrando o motor BT-24 durante o seu teste estático.

As Figuras A1 a A15, 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 A15, no Apêndice A, destaca-se o seguinte:

- 1) As curvas de empuxo *versus* tempo dos motores BT-7 a BT-12, da Classe A6, Figuras A1 a A6, são qualitativamente bastante similares.
- 2) As curvas de empuxo *versus* tempo dos motores BT-14 a BT-18, da Classe B6, Figuras A7 a A11, são qualitativamente diferentes em geral.
- 3) As curvas de empuxo *versus* tempo dos motores BT-19 a BT-24, da Classe C6, Figuras A12 a A15, são qualitativamente 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 A15. 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-7, e no Apêndice D, os respectivos resultados obtidos pelo aplicativo.

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:

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

$$Emed = \frac{It}{tq} \quad (3)$$

$$Is = \frac{It}{gMp} \quad (4)$$

onde g é a aceleração local da gravidade; o valor usado foi 9,7876 m/s².

Tabela 3. Resultados principais das curvas de empuxo.

Motor	tq (s)	Emed (N)	It (Ns)	Classe	Is (s)
BT-7	0,630	2,55	1,61	A3	68,9
BT-8	0,612	2,74	1,68	A3	67,4
BT-9	0,524	2,79	1,46	A3	65,5
BT-10	0,619	3,01	1,87	A3	70,3
BT-11	0,588	3,08	1,81	A3	71,8
BT-12	0,576	2,95	1,70	A3	69,5
BT-13	?	?	?	?	?
BT-14	0,988	4,08	4,03	B4	85,9
BT-15	1,225	3,22	3,95	B3	72,4
BT-16	1,121	3,35	3,75	B3	77,4
BT-17	1,223	2,91	3,56	B3	72,8
BT-18	1,226	3,17	3,89	B3	73,4
BT-19	1,800	3,43	6,17	C3	78,9
BT-20	?	?	?	?	?
BT-21	?	?	?	?	?
BT-22	1,781	3,06	5,46	C3	71,2
BT-23	1,785	2,90	5,19	C3	68,0
BT-24	1,791	3,00	5,38	C3	69,6

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 apenas três classes, conforme o intervalo de impulso total: 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 junto à 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: Emax = empuxo máximo; Emin = empuxo mínimo, fixo em 0,25 N; fm = fluxo de massa médio do propelente; e c = velocidade de ejeção efetiva média dos gases. O valor de Emax 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. 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 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-7	4,01	1,57	6,23	3,79	674
BT-8	5,16	1,88	4,84	4,16	659
BT-9	4,77	1,71	5,24	4,36	641
BT-10	4,96	1,64	5,04	4,38	688
BT-11	5,40	1,75	4,63	4,38	703
BT-12	4,44	1,50	5,63	4,34	680
BT-13	?	?	?	?	?
BT-14	13,36	3,27	1,87	4,86	841
BT-15	4,64	1,44	5,39	4,55	709
BT-16	7,47	2,23	3,35	4,42	757
BT-17	6,48	2,23	3,86	4,08	713
BT-18	4,43	1,40	5,65	4,41	719
BT-19	5,42	1,58	4,61	4,44	772
BT-20	?	?	?	?	?
BT-21	?	?	?	?	?
BT-22	4,42	1,44	5,65	4,39	697
BT-23	3,43	1,18	7,30	4,37	665
BT-24	4,11	1,37	6,09	4,41	681

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

- 1) O empuxo médio de todos os motores testados é 3,1 N, ou 3 N ao se arredondar E_{med} para um número inteiro. Sua incerteza pode chegar a 37%.
- 2) São quase constantes em todos os motores: I_s (72 s); f_m (4,4 g/s); e c (710 m/s). Suas incertezas podem chegar a 21%.
- 3) O tempo de queima (t_q) e o impulso total (I_t) são quase lineares com a massa de propelente (M_p). Suas incertezas podem chegar a 25%.
- 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 27 e 139%.
- 6) O fabricante denota seus motores como A6, B6 e C6. Mas eles deveriam ser classificados como A3, B3 e C3.

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

Motores	BT-7 a 12	BT-13 a 18	BT-19 a 24
Classe	A3	B3	C3
It (Ns)	1,69	3,84	5,6
U de It (Ns)	0,37	0,51	1,4
U de It (%)	22	13	25
Emed (N)	2,85	3,3	3,10
U de Emed (N)	0,51	1,2	0,74
U de Emed (%)	18	37	24
tq (s)	0,59	1,16	1,79
U de tq (s)	0,10	0,29	0,03
U de tq (%)	17	25	1,5
Is (s)	68,9	76	72
U de Is (s)	5,7	16	15
U de Is (%)	8,3	21	21
E _{max} (N)	4,8	7	4,3
U de E _{max} (N)	1,3	10	2,6
U de E _{max} (%)	27	139	61
fm (g/s)	4,24	4,46	4,40
U de fm (g/s)	0,60	0,78	0,10
U de fm (%)	14	18	2,2
c (m/s)	674	748	704
U de c (m/s)	56	154	151
U de c (%)	8,3	21	21

Da Tabela 6, destaca-se o seguinte:

- 1) O desvio-padrão do impulso total (It) dos motores BT fica entre 4,9 e 8,9%, e os demais motores entre 1,3 e 3,2%. Portanto, os motores BT das classes A6 e C6 não atendem a um dos requisitos da norma NFPA 1125 (www.thrustcurve.org, 2009), isto é, o desvio-padrão de It deve ser menor 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. Pode-se ver que todos os motores Apogee, Quest e Estes atendem a esta norma, bem como os motores BT da classe B6.
- 2) O desvio-padrão do tempo de queima (tq) dos motores BT fica entre 0,6 e 8,6%, e os demais motores entre 1,8 e 17%.
- 3) O desvio-padrão do empuxo máximo (E_{max}) dos motores BT fica entre 10 e 50%, e os demais motores entre 1,4 e 21%.
- 4) O impulso específico (Is) dos motores BT fica entre 69 e 76 s, e os demais motores entre 67 e 84 s.
- 5) A variação do empuxo médio (ΔE_{med}) de cada tipo de motor BT é de no máximo 0,73 N. Portanto, os motores BT atendem a um dos requisitos da norma NFPA 1125 (www.thrustcurve.org, 2009), isto é, ΔE_{med} deve ser menor do que 1 N. ΔE_{med} é a variação

máxima entre os valores de Emed e a média dos valores de Emed de um determinado tipo de motor.

- 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 tq, Is e ΔE_{med} , e são de menor qualidade para It e Emax.

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	1,69	4,33	4,63	3,84	8,82	8,85	5,55
σ de It (Ns)	0,05	0,03	0,15	0,08	0,15	0,19	0,18	0,21	0,43
σ de It (%)	2,0	1,3	8,9	1,8	3,2	4,9	2,0	2,4	7,7
tq (s)	1,31	0,55	0,59	0,86	0,75	1,16	1,86	2,24	1,79
σ de tq (s)	0,06	0,01	0,04	0,15	0,07	0,10	0,31	0,04	0,01
σ de tq (%)	4,6	1,8	6,8	17	9,3	8,6	17	1,8	0,6
E _{max} (N)	4,82	10,07	4,79	12,14	14,38	7,28	14,09	23,30	4,34
σ de E _{max} (N)	1,00	0,14	0,50	1,57	1,15	3,63	2,94	0,82	0,83
σ de E _{max} (%)	21	1,4	10	13	8,0	50	21	3,5	19
E _{med} (N)	1,89	4,16	2,85	5,03	6,17	3,35	4,74	3,95	3,10
ΔE_{med} (N)	?	0,15	0,30	?	?	0,73	?	?	0,33
ΔE_{med} (%)	?	3,6	11	?	?	22	?	?	11
Mp (g)	3,0	3,5	2,50	5,6	6,5	5,15	10,8	12,0	7,85
Is (s)	84	67	69	79	73	76	83	75	72

(g = 9,7876 m/s²)

A Figura 10 apresenta o resultado experimental do impulso total (It) *versus* massa de propelente (Mp) de 15 dos 18 motores testados. Com base nestes resultados, foi feito um ajuste linear por mínimos quadrados (Kreyszig, 1999), que resultou na seguinte expressão:

$$It = 0,721Mp - 0,04 \quad (7)$$

onde Mp é dado em gramas e It em Ns. Pode-se ver na Figura 10 que apenas um dos 15 resultados experimentais está fora do desvio de $\pm 10\%$.

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 4,7%.
- 2) As incertezas de Mo e Mf podem chegar a 8,4%, e as de Mp a 18%.
- 3) O empuxo médio de todos os motores testados é 3,1 N, ou 3 N ao se arredondar Emed para um número inteiro. Sua incerteza pode chegar a 37%.
- 4) São quase constantes em todos os motores: Is (72 s); fm (4,4 g/s); e c (710 m/s). Suas incertezas podem chegar a 21%.

- 5) O tempo de queima (t_q) e o impulso total (I_t) são quase lineares com a massa de propelente (M_p). Suas incertezas podem chegar a 25%.
- 6) As incertezas de E_{max} ficam entre 27 e 139%.
- 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. Mas eles deveriam ser classificados como A3, B3 e C3.
- 9) Os motores BT são da mesma qualidade de fabricantes dos Estados Unidos em relação aos parâmetros t_q , I_s e ΔE_{med} , e são de menor qualidade para I_t e E_{max} .
- 10) Obteve-se uma correlação empírica, Eq. (7) e Figura 10, que prevê o impulso total (I_t) em função da massa de propelente (M_p), com incerteza de $\pm 10\%$.

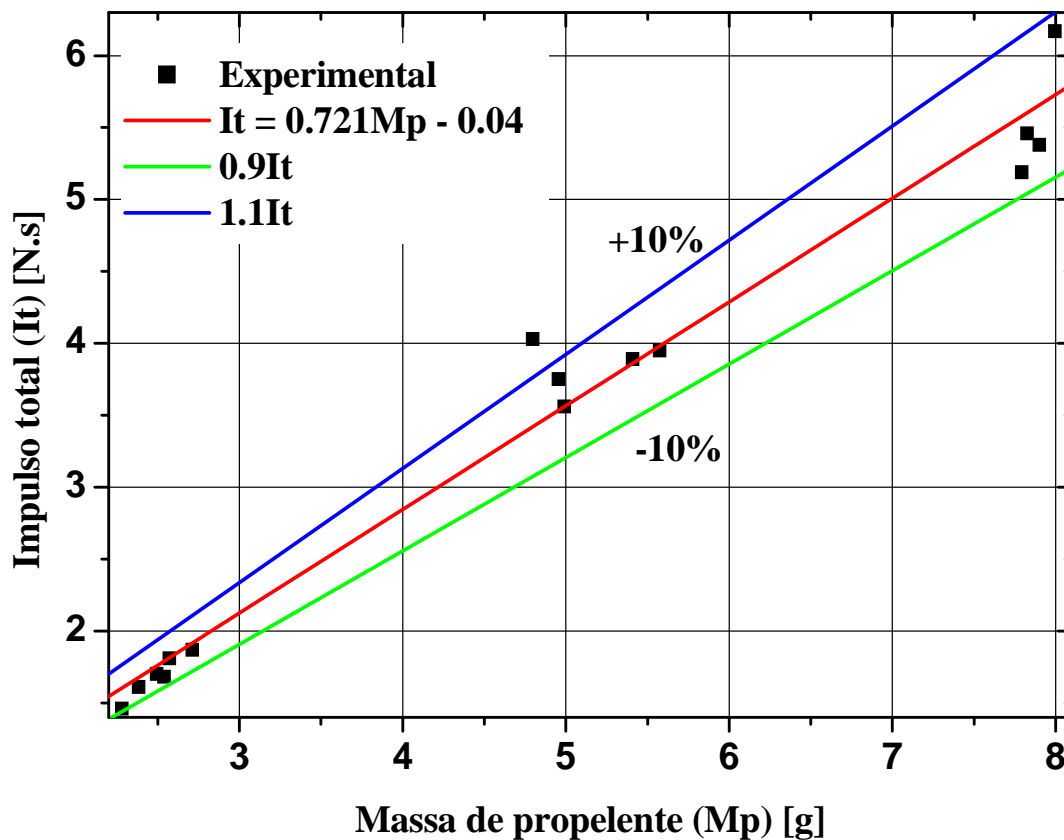


Figura 10. Impulso total *versus* massa de propelente.

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 eng. 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 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.

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

www.nar.org (2009).

www.thrustcurve.org (2009).

APÊNDICE A – curvas de empuxo x tempo

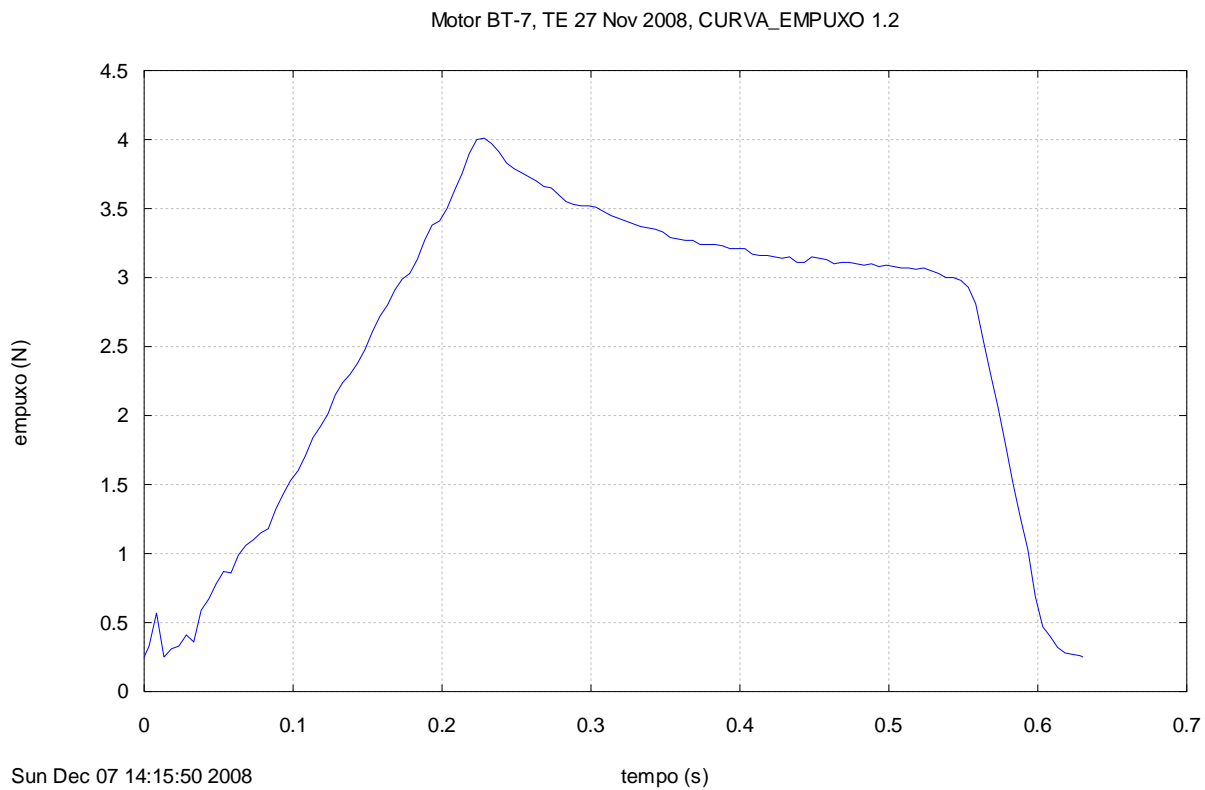


Figura A1. Curva empuxo versus tempo processada do motor-foguete BT-7.

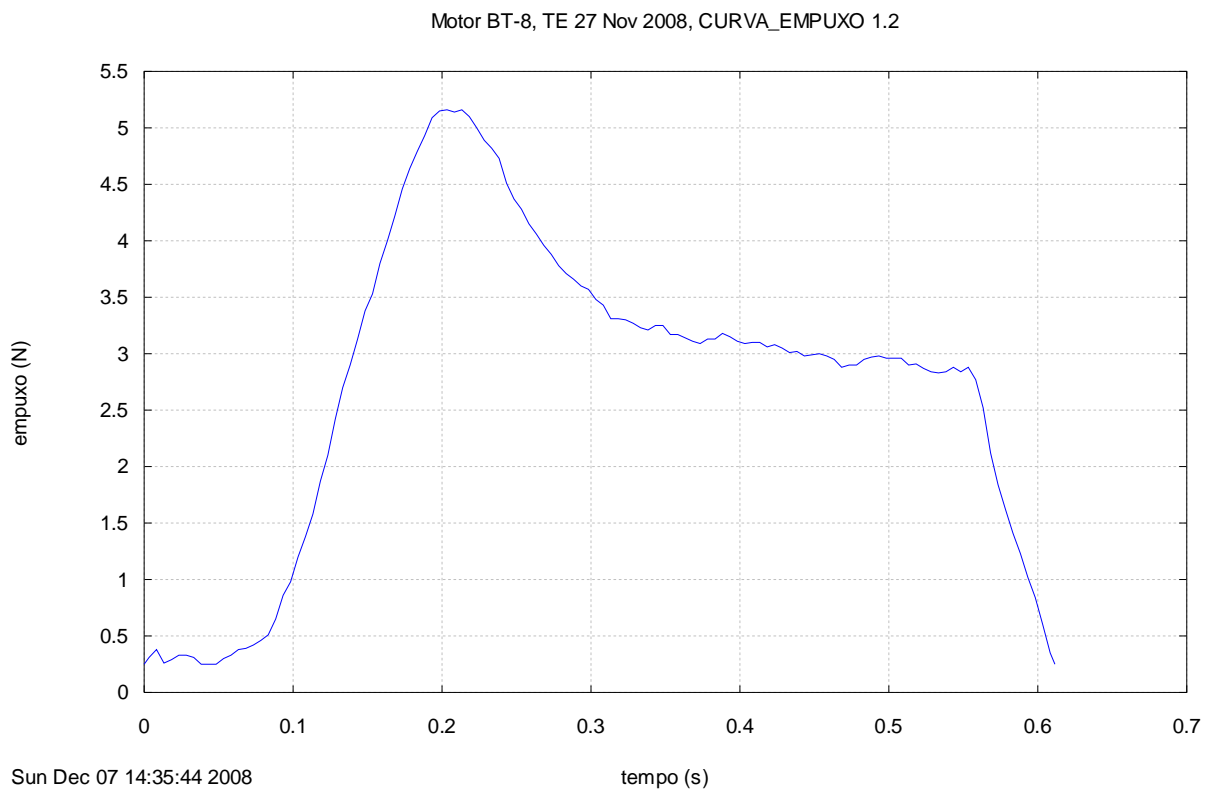


Figura A2. Curva empuxo versus tempo processada do motor-foguete BT-8.

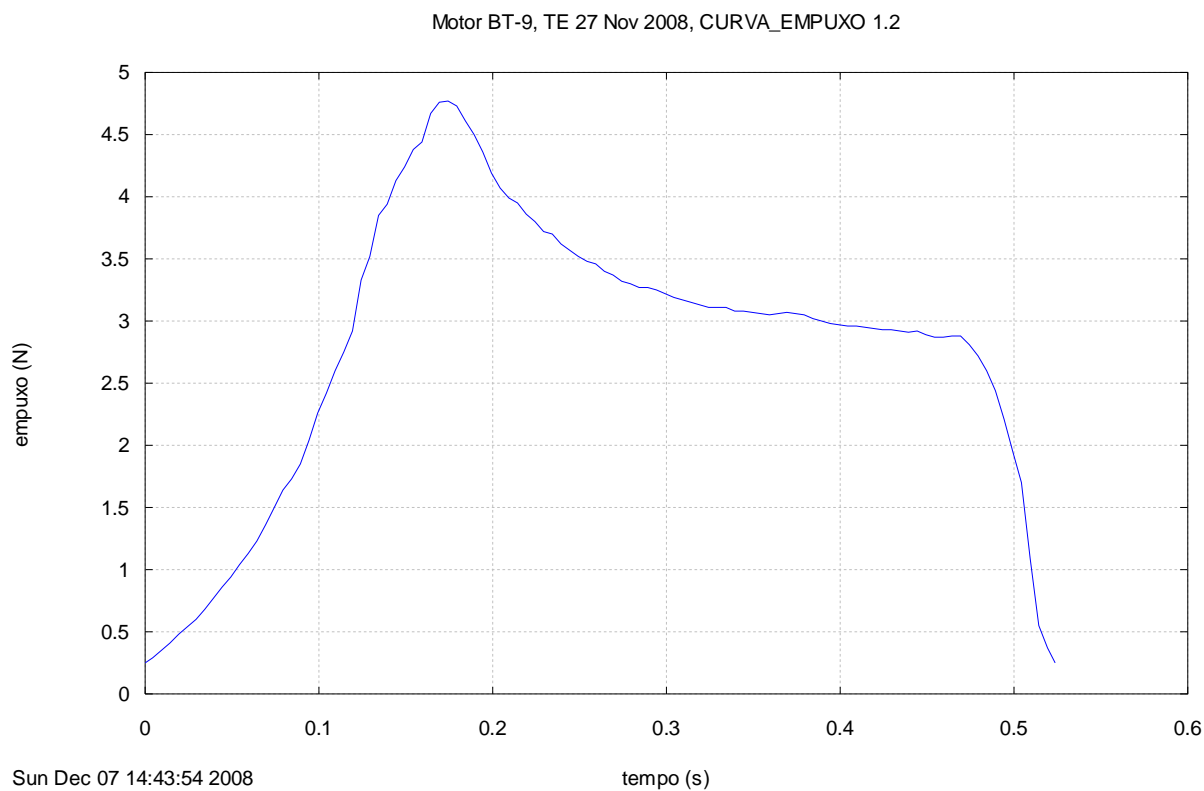


Figura A3. Curva empuxo versus tempo processada do motor-foguete BT-9.

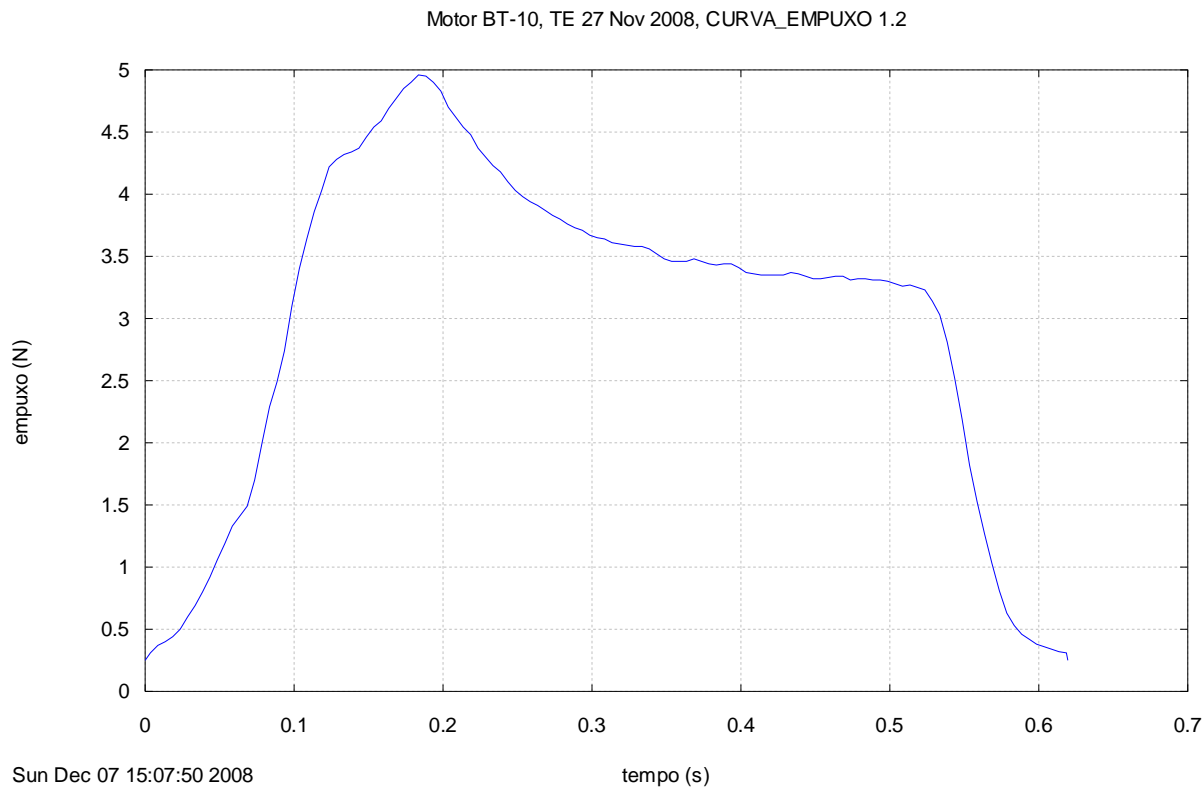


Figura A4. Curva empuxo versus tempo processada do motor-foguete BT-10.

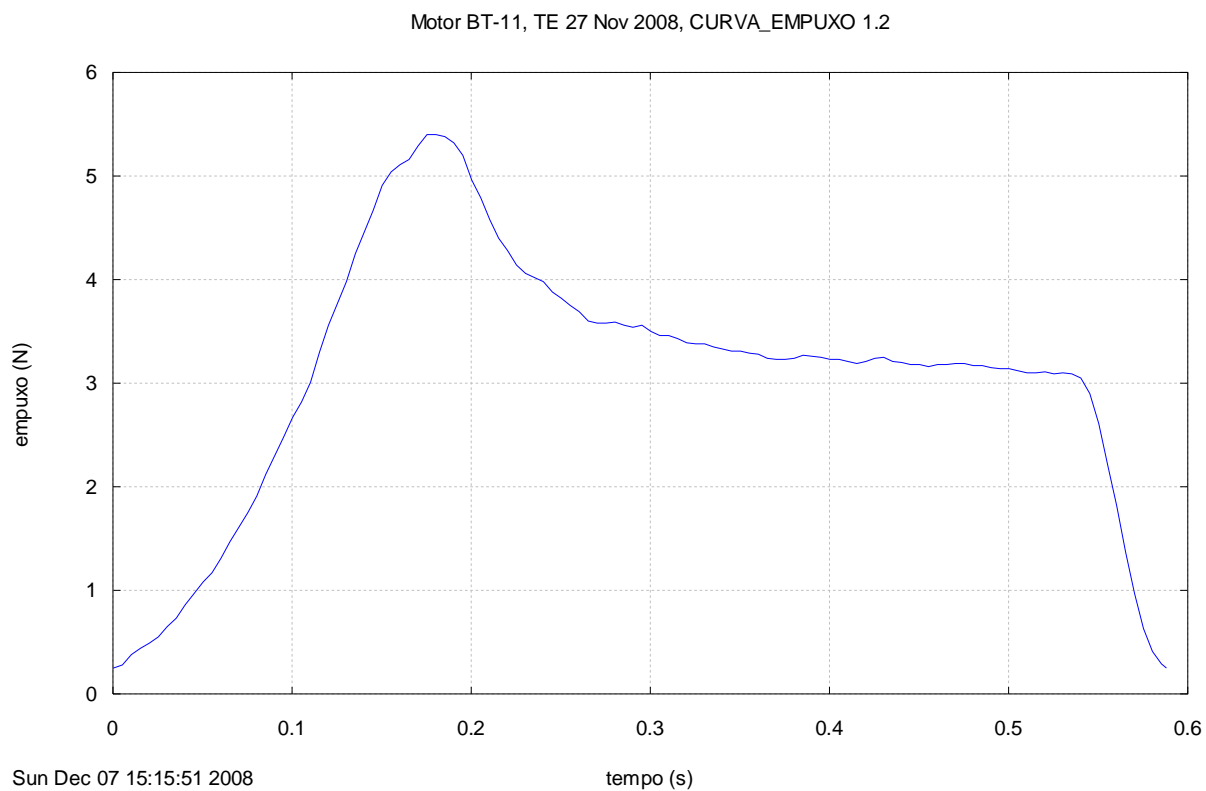


Figura A5. Curva empuxo *versus* tempo processada do motor-foguete BT-11.

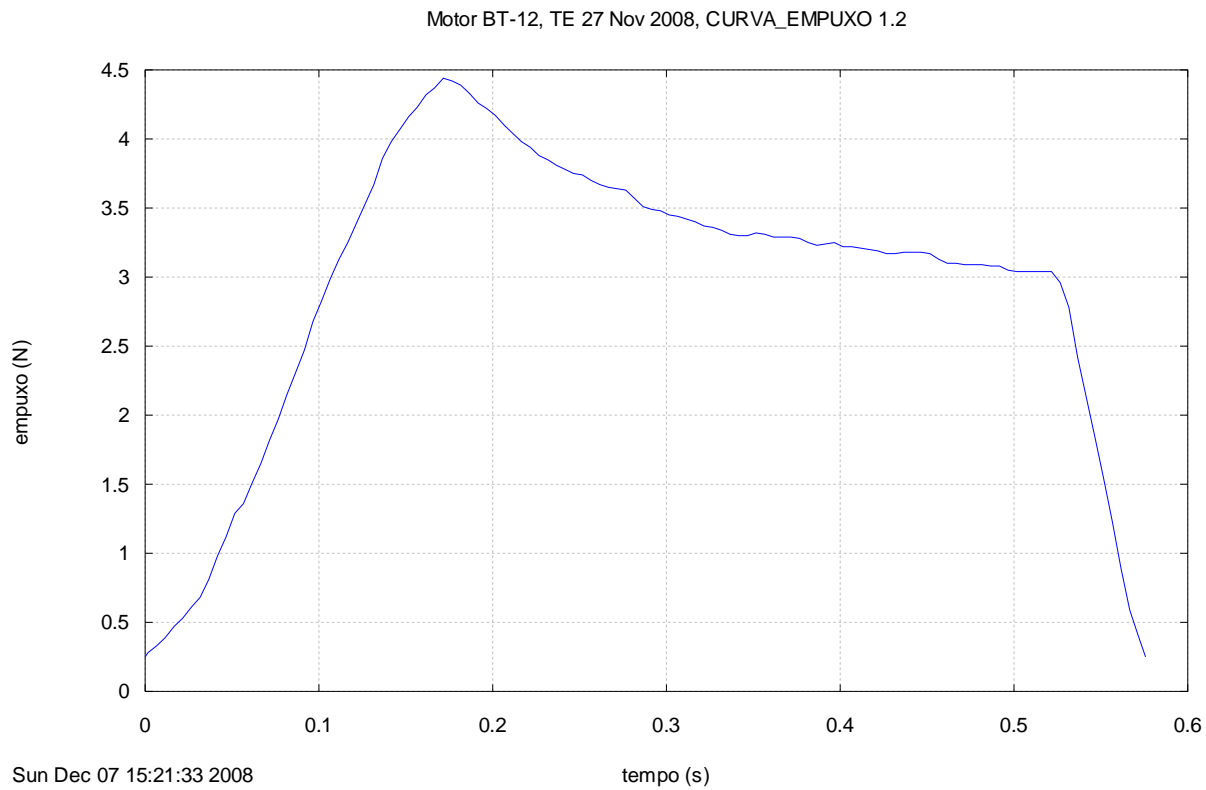


Figura A6. Curva empuxo *versus* tempo processada do motor-foguete BT-12.

Motor BT-14, TE 27 Nov 2008, CURVA_EMPUXO 1.2

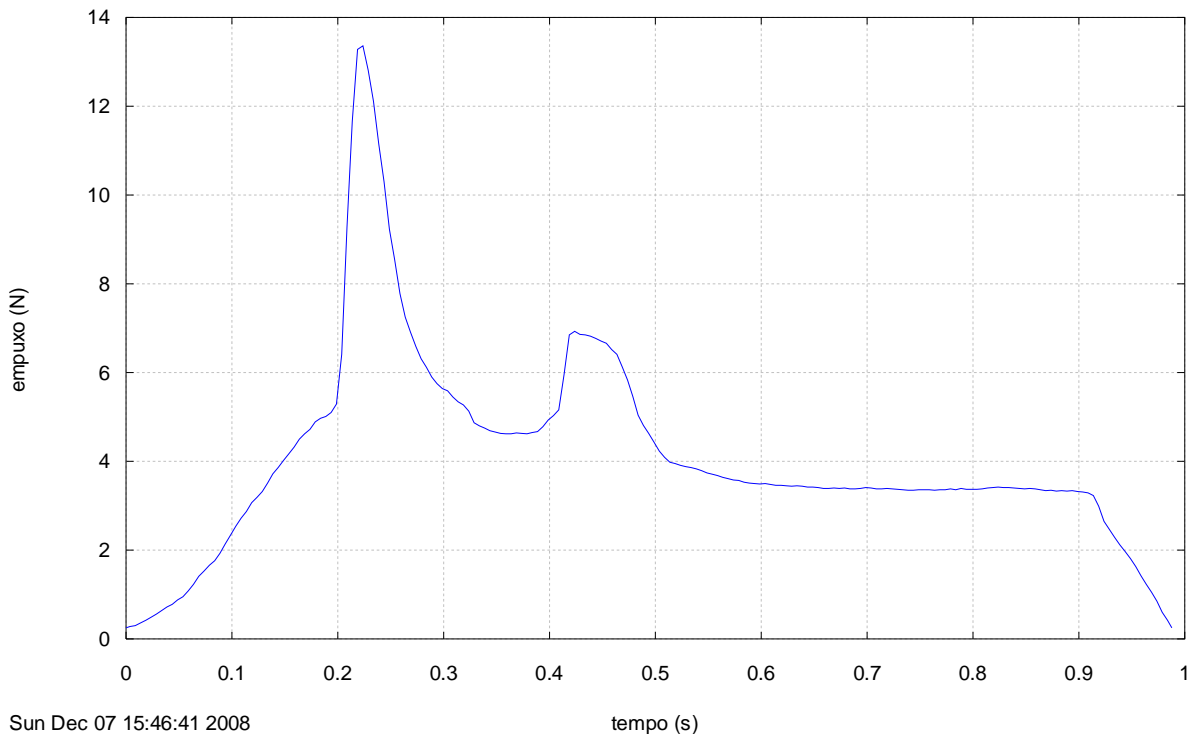


Figura A7. Curva empuxo versus tempo processada do motor-foguete BT-14.

Motor BT-15, TE 27 Nov 2008, CURVA_EMPUXO 1.2

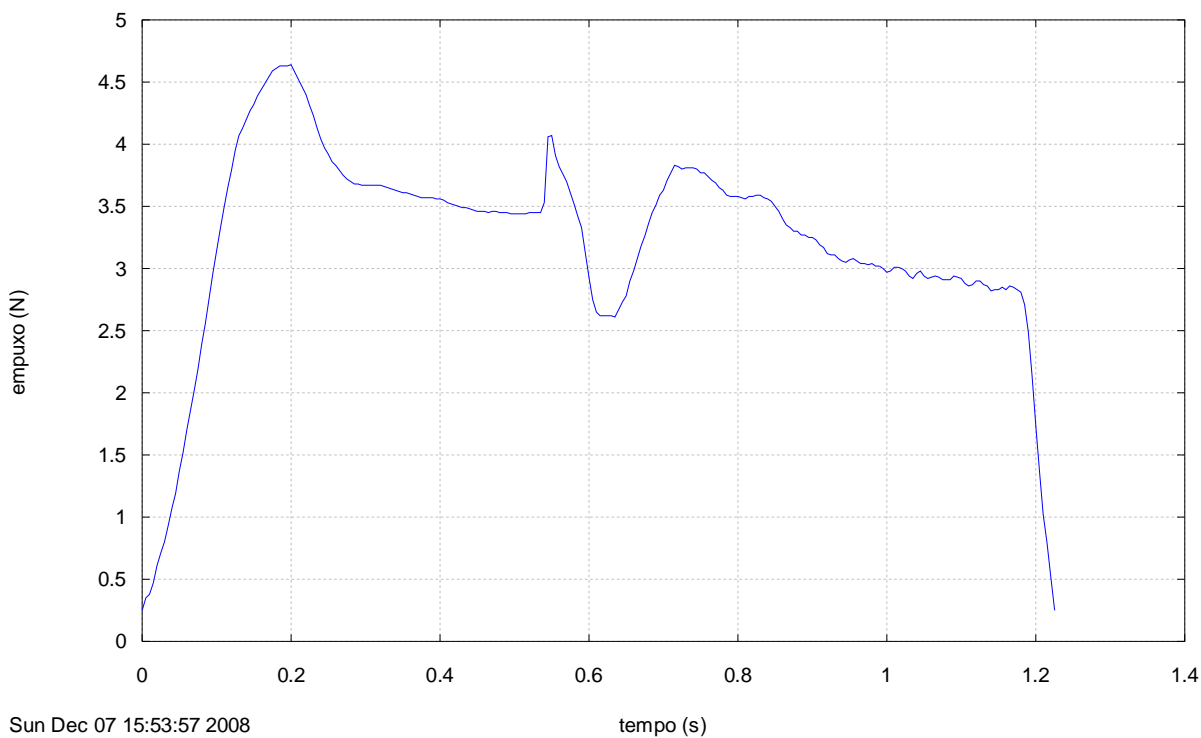


Figura A8. Curva empuxo versus tempo processada do motor-foguete BT-15.

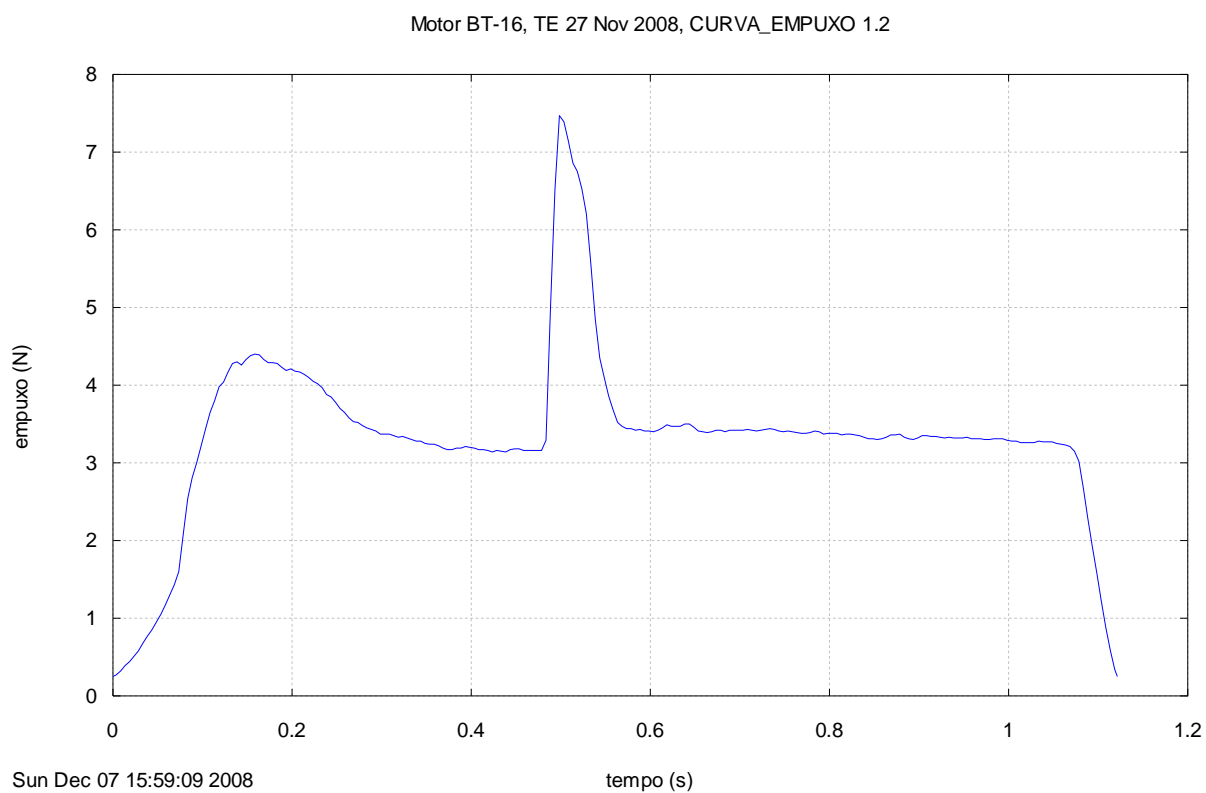


Figura A9. Curva empuxo *versus* tempo processada do motor-foguete BT-16.

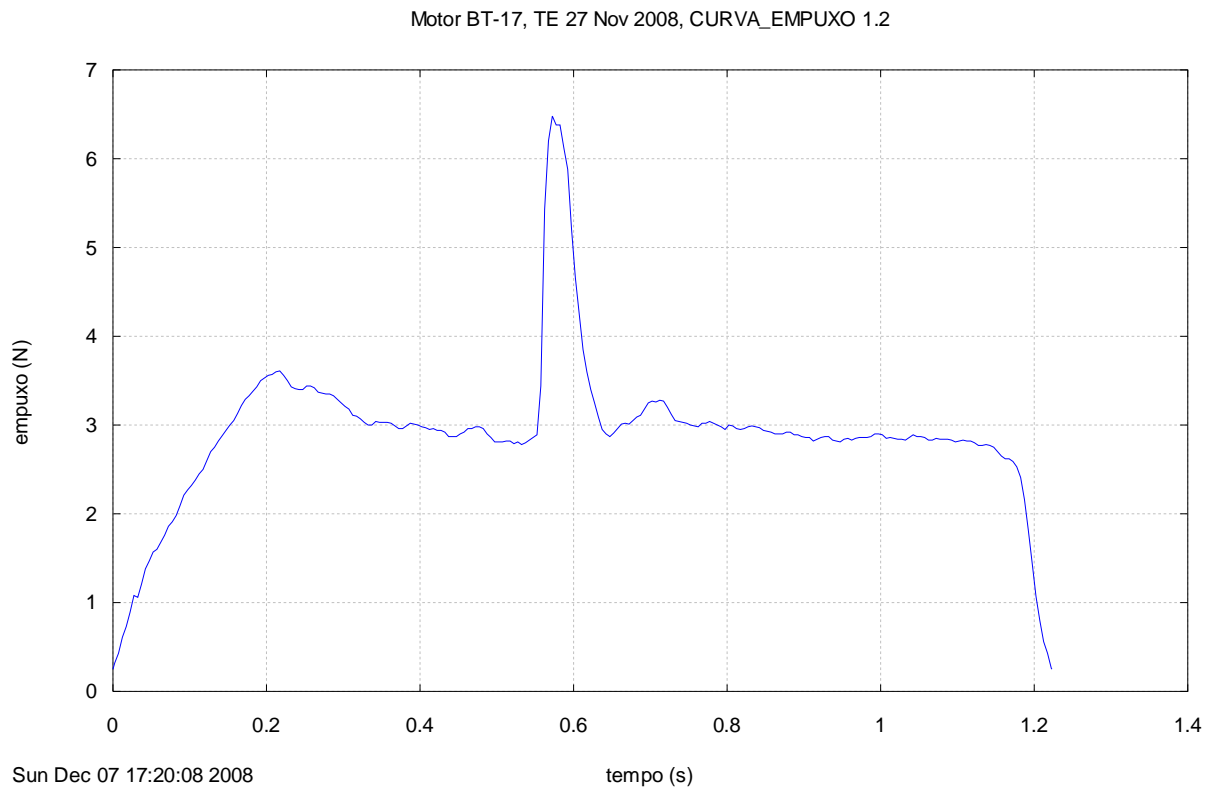


Figura A10. Curva empuxo *versus* tempo processada do motor-foguete BT-17.

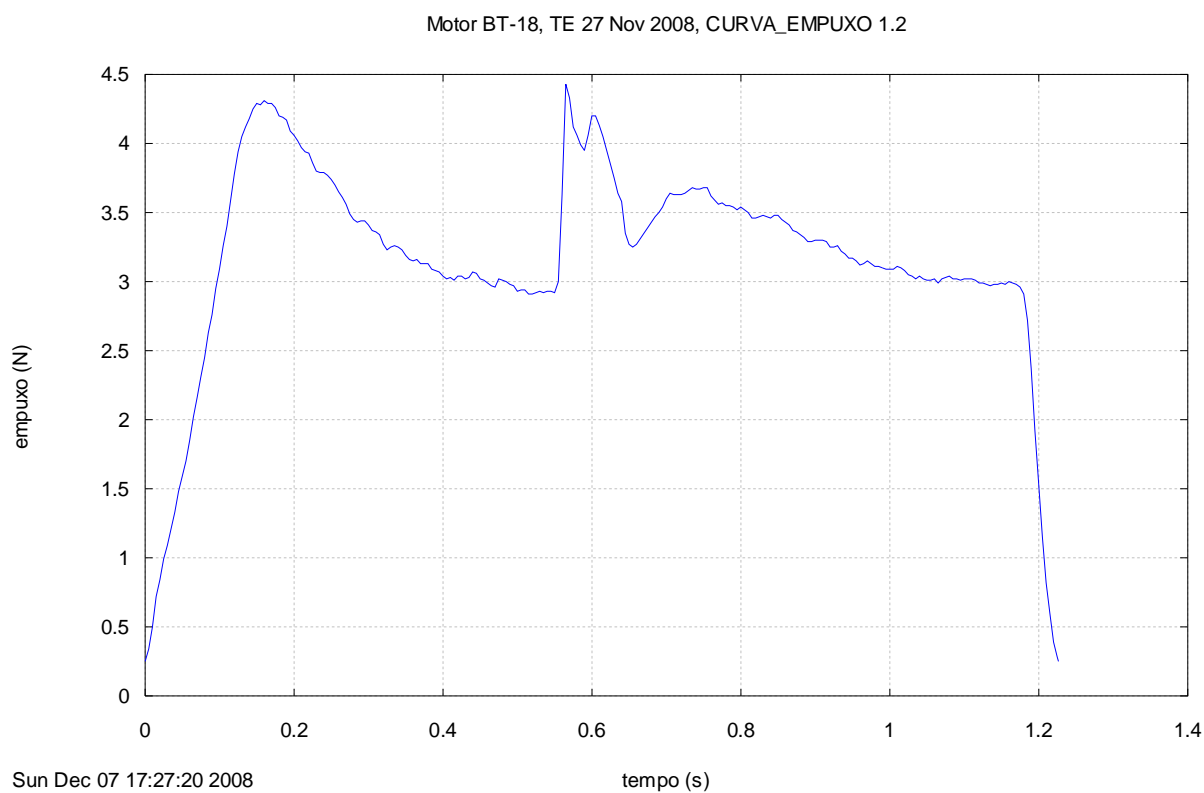


Figura A11. Curva empuxo versus tempo processada do motor-foguete BT-18.

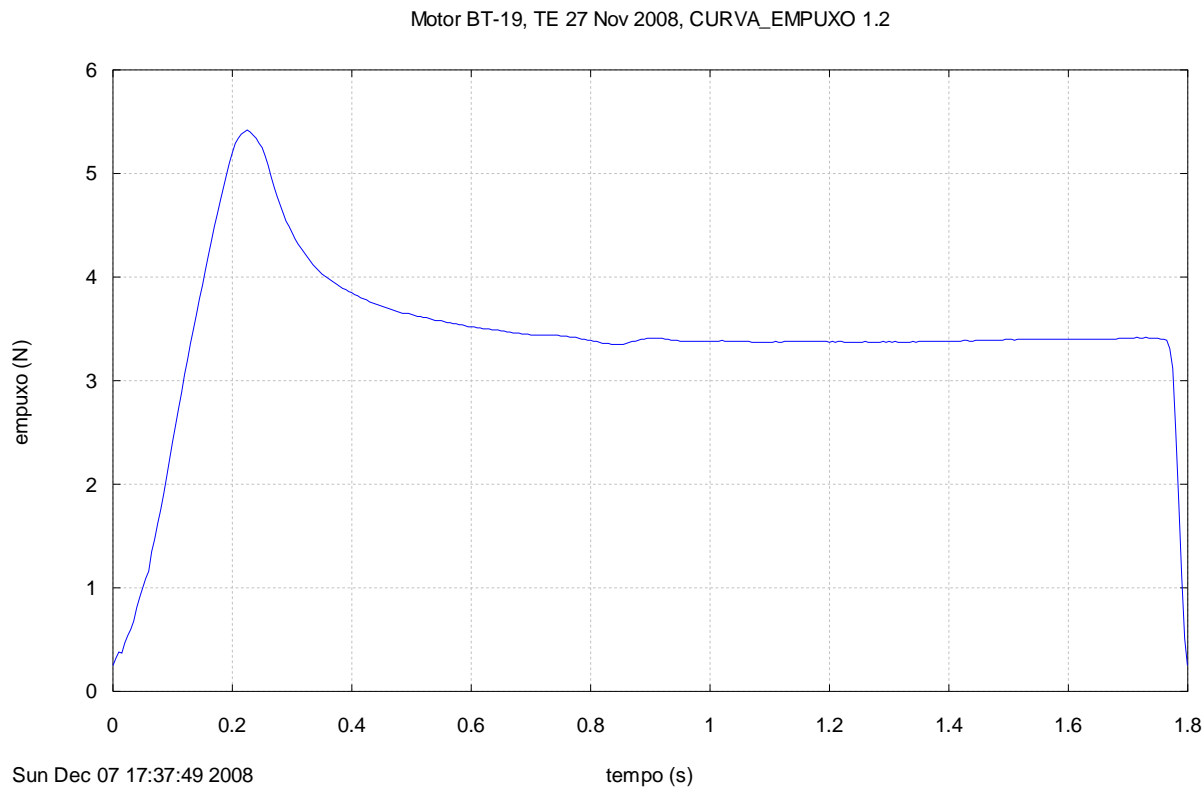


Figura A12. Curva empuxo versus tempo processada do motor-foguete BT-19.

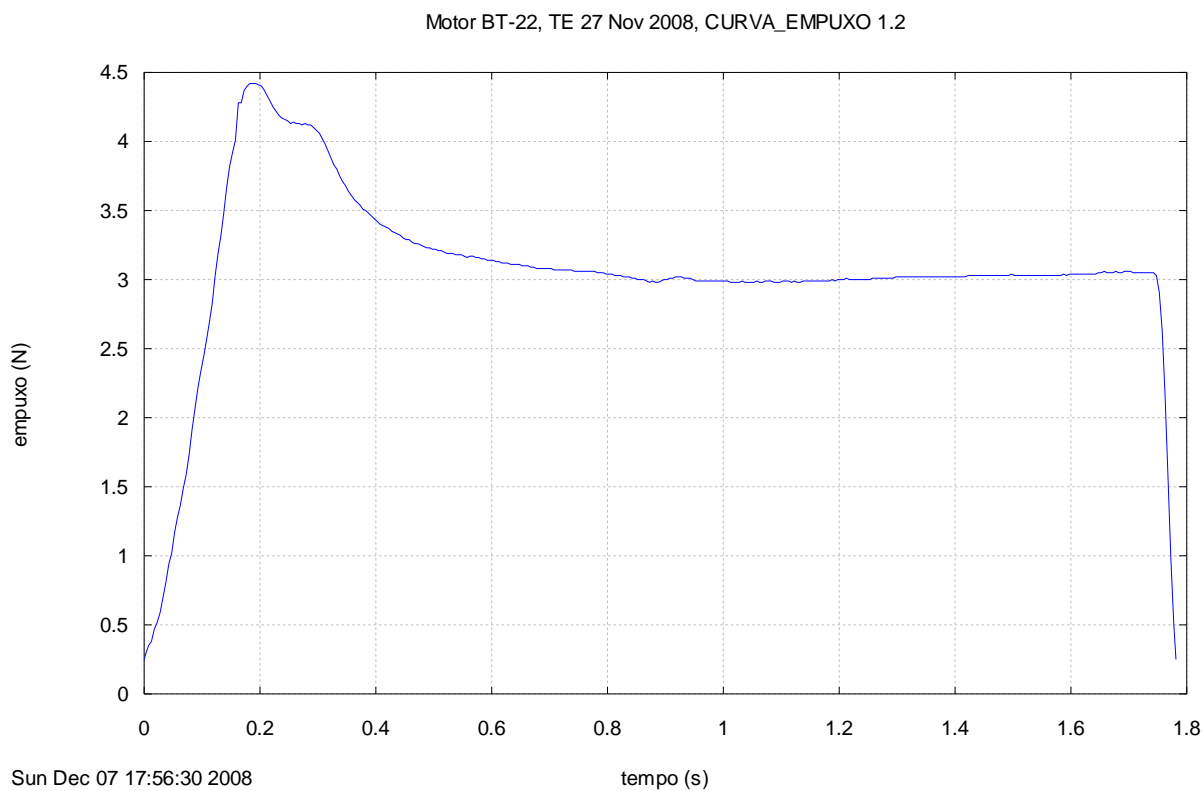


Figura A13. Curva empuxo versus tempo processada do motor-foguete BT-22.

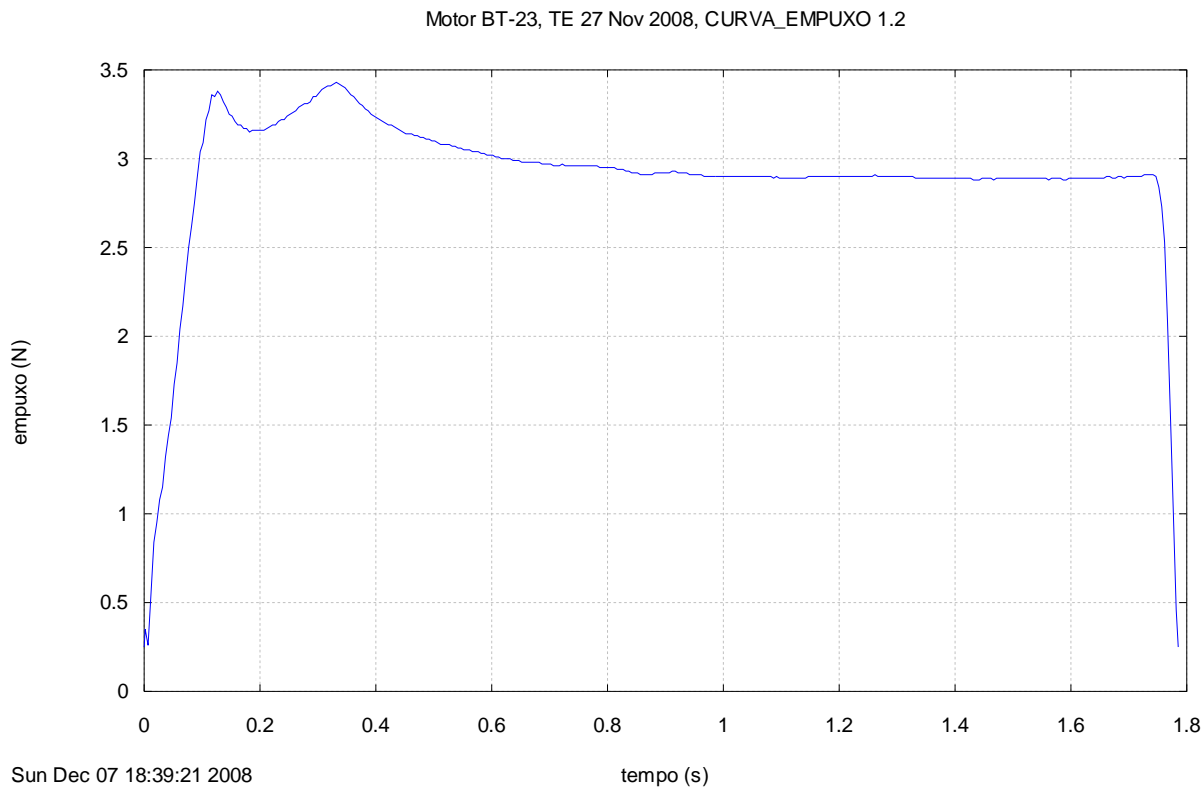


Figura A14. Curva empuxo versus tempo processada do motor-foguete BT-23.

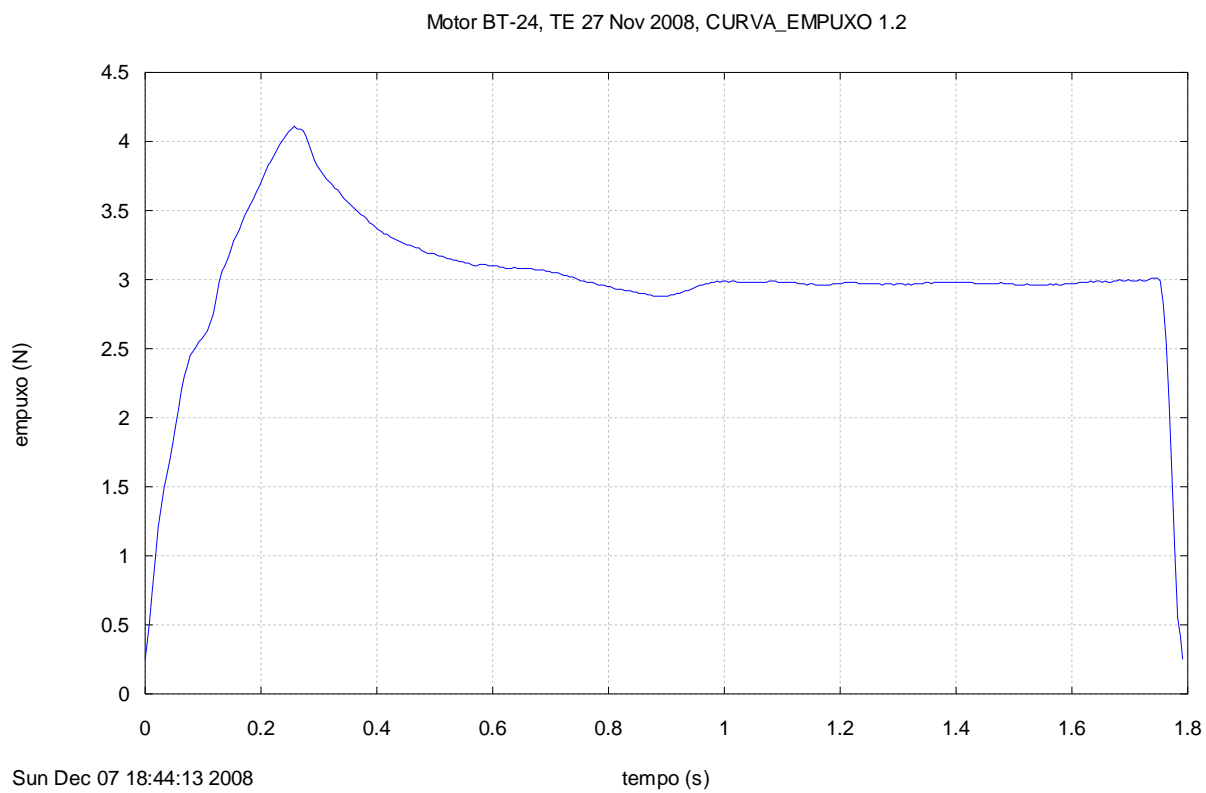


Figura A15. Curva empuxo *versus* tempo processada do motor-foguete BT-24.

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-7

```
'Motor_BT-7_HBM.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)
  2.386d-3 ..... M        = Massa de propelente (kg)
  9.7876d0 ..... g        = Aceleração gravitacional local (m/s2)
'curva_empuxo_lp2_BT-7_saida.txt' ..... caso = nome do arquivo de saída
'Motor BT-7, TE 27 Nov 2008, CURVA_EMPUXO 1.2' ! titulo = título de identificação da análise
```

APÊNDICE D – Resultados do aplicativo Curva_Empuxo 1.2 para o motor BT-7

Saída do programa CURVA_EMPUXO 1.2, versão de 9 Nov 2008

Caso = curva_empuxo_1p2_BT-7_saida.txt

Título = Motor BT-7, TE 27 Nov 2008, CURVA_EMPUXO 1.2

*** CURVA EMPUXO X TEMPO ***

t (s)	empuxo (N)
0.0000	0.25
0.0033	0.33
0.0083	0.57
0.0133	0.25
0.0183	0.31
0.0233	0.33
0.0283	0.41
0.0333	0.36
0.0383	0.59
0.0433	0.67
0.0483	0.78
0.0533	0.87
0.0583	0.86
0.0633	0.99
0.0683	1.06
0.0733	1.10
0.0783	1.15
0.0833	1.18
0.0883	1.32
0.0933	1.43
0.0983	1.53
0.1033	1.60
0.1083	1.71
0.1133	1.84
0.1183	1.92
0.1233	2.01
0.1283	2.15
0.1333	2.24
0.1383	2.30
0.1433	2.38
0.1483	2.48
0.1533	2.61
0.1583	2.72
0.1633	2.80
0.1683	2.91
0.1733	2.99
0.1783	3.03
0.1833	3.13
0.1883	3.27
0.1933	3.38
0.1983	3.41
0.2033	3.50
0.2083	3.63
0.2133	3.75
0.2183	3.90
0.2233	4.00
0.2283	4.01
0.2333	3.97
0.2383	3.91
0.2433	3.83

0.2483	3.79
0.2533	3.76
0.2583	3.73
0.2633	3.70
0.2683	3.66
0.2733	3.65
0.2783	3.60
0.2833	3.55
0.2883	3.53
0.2933	3.52
0.2983	3.52
0.3033	3.51
0.3083	3.48
0.3133	3.45
0.3183	3.43
0.3233	3.41
0.3283	3.39
0.3333	3.37
0.3383	3.36
0.3433	3.35
0.3483	3.33
0.3533	3.29
0.3583	3.28
0.3633	3.27
0.3683	3.27
0.3733	3.24
0.3783	3.24
0.3833	3.24
0.3883	3.23
0.3933	3.21
0.3983	3.21
0.4033	3.21
0.4083	3.17
0.4133	3.16
0.4183	3.16
0.4233	3.15
0.4283	3.14
0.4333	3.15
0.4383	3.11
0.4433	3.11
0.4483	3.15
0.4533	3.14
0.4583	3.13
0.4633	3.10
0.4683	3.11
0.4733	3.11
0.4783	3.10
0.4833	3.09
0.4883	3.10
0.4933	3.08
0.4983	3.09
0.5033	3.08
0.5083	3.07
0.5133	3.07
0.5183	3.06
0.5233	3.07
0.5283	3.05
0.5333	3.03
0.5383	3.00
0.5433	3.00
0.5483	2.98
0.5533	2.93
0.5583	2.81
0.5633	2.55

0.5683	2.30
0.5733	2.06
0.5783	1.79
0.5833	1.51
0.5883	1.26
0.5933	1.03
0.5983	0.69
0.6033	0.47
0.6083	0.40
0.6133	0.32
0.6183	0.28
0.6233	0.27
0.6283	0.26
0.6304	0.25

*** Motor BT-7, TE 27 Nov 2008, CURVA_EMPUXO 1.2 ***

2.39 = massa de propelente (g)

9.7876 = aceleração gravitacional local (m/s²)

0.25 = empuxo mínimo (N)

4.01 = empuxo máximo (N)

2.370 = tempo original do empuxo máximo (s)

0.228 = tempo corrigido do empuxo máximo (s)

2.142 = tempo original inicial (s)

2.772 = tempo original final (s)

0.630 = tempo de queima (s)

1.61 = impulso total (Ns)

2.55 = empuxo médio (N)

674.1 = velocidade de exaustão efetiva média (m/s)

68.9 = impulso específico médio (s)

3.79 = fluxo de massa médio (g/s)

1.57 = razão empuxo máximo / empuxo médio

6.23 = razão empuxo mínimo / empuxo máximo (%)

classificação do motor = A 3