



Testes estáticos de 22 Mar 2010 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, 6 de setembro de 2010.

1 INTRODUÇÃO

Este relatório descreve 12 testes estáticos com motores-foguete de espaçomodelos a propelente sólido do tipo BT (Bandeirante). Os testes foram realizados em 22 de março de 2010, 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 para 4, 6 e 10 testes de cada tipo de motor, ao se considerar os testes de 22 de março de 2010 e os de 28 de setembro de 2009 (Marchi, 2009), sendo todos os motores do mesmo lote de fabricação.

2 DESCRIÇÃO DOS MOTORES-FOGUETE

As Figuras 1 a 3 mostram seis fotos dos 12 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).

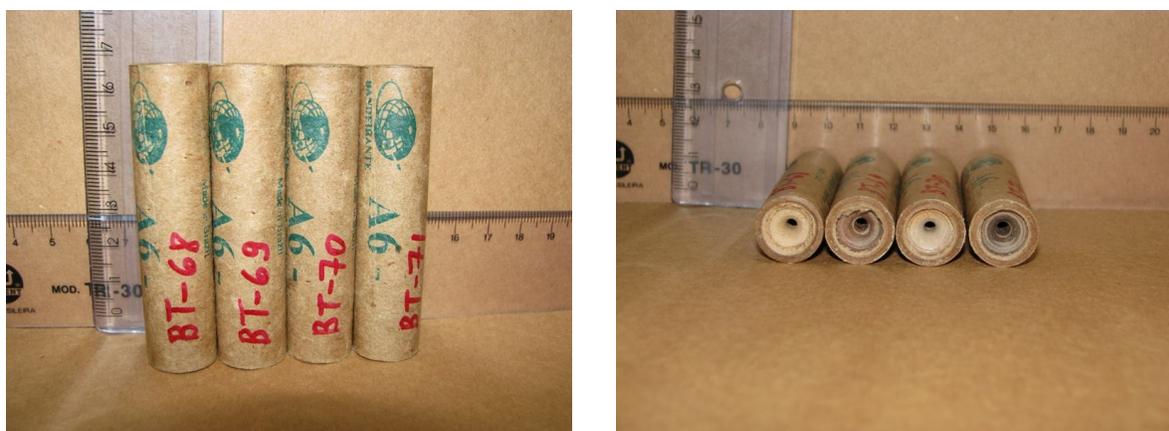


Figura 1. Fotos mostrando os motores-foguete BT-68 a BT-71 do tipo A6.

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 (Figura 4). M_o e M_f foram medidos com uma balança Marte AY220 (Figura 5), 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-72 a BT-75 do tipo B6.



Figura 3. Fotos mostrando os motores-foguete BT-76 a BT-79 do tipo C6.

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. Dimensões e massas de cada motor-foguete.

Classe	Motor	De (mm)	Lt (mm)	Mo (g)	Mf (g)	Mp (g)
A6-0	BT-68	17,33	71,59	12,737	10,952	1,785
	BT-69	17,32	71,43	12,986	11,062	1,924
	BT-70	17,16	71,65	12,940	10,891	2,049
	BT-71	17,41	71,66	11,989	10,149	1,840
B6-0	BT-72	17,32	71,50	15,987	10,687	5,300
	BT-73	17,02	70,65	15,047	10,087	4,960
	BT-74	17,58	71,50	15,416	10,350	5,066
	BT-75	17,40	71,01	15,687	10,674	5,013
C6-0	BT-76	17,43	71,65	18,522	11,204	7,318
	BT-77	17,62	71,33	17,689	10,440	7,249
	BT-78	17,49	71,74	17,675	10,619	7,056
	BT-79	17,25	71,70	17,532	10,200	7,332

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

Motores	BT-68 a 71	BT-72 a 75	BT-76 a 79
De (mm)	17,30	17,33	17,45
U de De (mm)	0,33	0,74	0,49
U de De (%)	1,9	4,3	2,8
Lt (mm)	71,58	71,2	71,60
U de Lt (mm)	0,34	1,3	0,59
U de Lt (%)	0,47	1,8	0,83
Mo (g)	12,7	15,5	17,9
U de Mo (g)	1,5	1,3	1,4
U de Mo (%)	12	8,2	8,0
Mf (g)	10,8	10,45	10,6
U de Mf (g)	1,3	0,91	1,4
U de Mf (%)	12	8,8	13
Mp (g)	1,90	5,08	7,24
U de Mp (g)	0,37	0,48	0,40
U de Mp (%)	19	9,4	5,6

Da Tabela 2, destaca-se o seguinte:

- 1) As incertezas de De ficam entre 1,9 e 4,3%, e 0,33 e 0,74 mm.
- 2) As incertezas de Lt ficam entre 0,47 e 1,8%, e 0,34 e 1,3 mm.
- 3) As incertezas de Mo e Mf ficam entre 8,0 e 13%, e 0,91 e 1,5 g.
- 4) As incertezas de Mp ficam entre 5,6 e 19%, e 0,37 e 0,48 g.
- 5) Em termos absolutos (g), as incertezas de Mp são menores do que Mo e Mf. Porém, as incertezas relativas (%) de Mo e Mf estão entre a maior e a menor incerteza relativa de Mp.

3 DESCRIÇÃO DOS TESTES ESTÁTICOS

Os 12 testes estáticos foram realizados em 22 de março de 2010, entre 13:50 e 14:25 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/> (2010). Durante os testes, a temperatura ambiente variou entre 24,4 e 25,3 °C e a pressão atmosférica entre 90,07 e 90,15 kPa. As temperaturas e pressões foram medidas com o altímetro RA123 da Oregon Venture (Figura 5).



Figura 4. Fotos mostrando o paquímetro digital Lee Tools usado nas medições.



Figura 5. Fotos mostrando a balança e o medidor de temperatura e pressão usados.

Foram empregados ignitores fabricados em novembro de 2008 pela Bandeirante (Figura 6). O sistema de ignição empregado foi o Quest, que usa bateria de 9 V e cujo condutor elétrico tem cerca de 5 m de comprimento (Figura 6). 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 7), cuja classe de acurácia é de 0,025 N. A bancada experimental pode ser vista na Figura 7.

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 7.

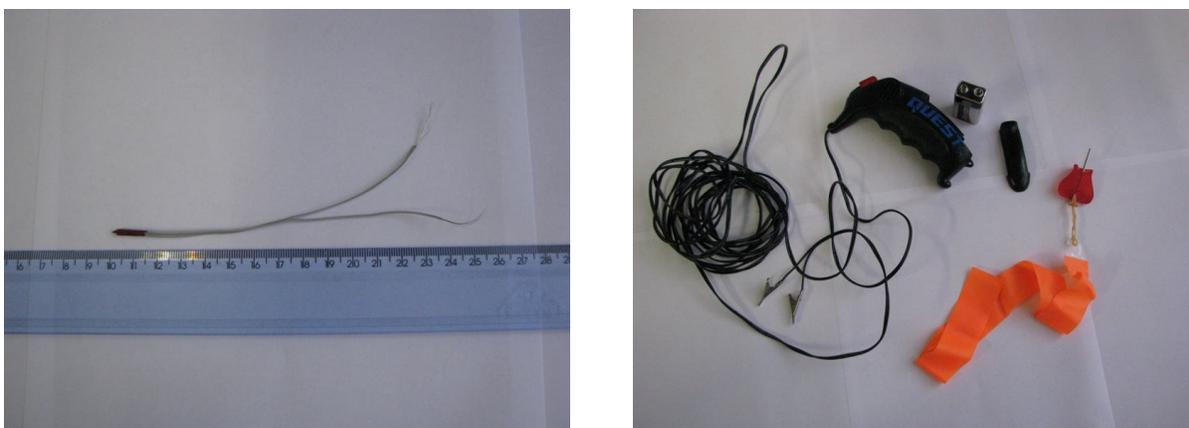


Figura 6. Fotos mostrando o tipo de ignitor e o sistema de ignição usados nos testes.

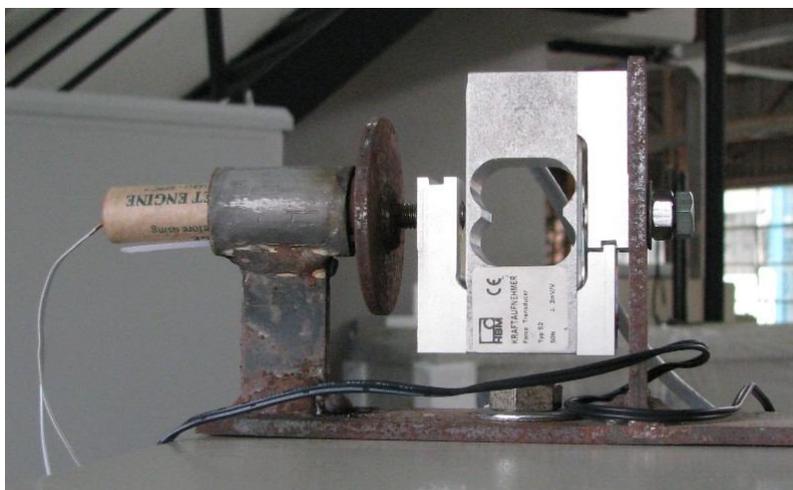


Figura 7. Foto da bancada experimental mostrando a célula de carga S2-50 da HBM e um motor preparado para o teste estático, já com o seu ignitor.

4 RESULTADOS

As Figuras 8 a 10 mostram os motores BT-68, 72 e 76 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 7), e por uma filmadora Sony HDR-SR10, de 4 megapixels (Figuras 8 a 10).



Figura 8. Foto mostrando o motor BT-68 (A6-0) durante o seu teste estático.



Figura 9. Foto mostrando o motor BT-72 (B6-0) durante o seu teste estático.



Figura 10. Foto mostrando o motor BT-76 (C6-0) durante o seu teste estático.

As Figuras A1 a A12, 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 (2010). Das Figuras A1 a A12, 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 A12. 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-79, 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-68	0,324	3,93	1,27	A4	72,8
BT-69	0,323	4,11	1,33	A4	70,6
BT-70	0,361	4,16	1,50	A4	74,8
BT-71	0,301	3,85	1,16	½A4	64,3
BT-72	1,011	3,86	3,90	B4	75,2
BT-73	1,006	3,83	3,85	B4	79,3
BT-74	0,961	4,26	4,10	B4	82,6
BT-75	0,824	5,05	4,16	B5	84,9
BT-76	1,449	3,81	5,51	C4	77,0
BT-77	1,409	4,08	5,75	C4	81,0
BT-78	1,363	4,14	5,65	C4	81,8
BT-79	1,437	3,99	5,73	C4	79,9

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-68	6,63	1,69	3,77	5,52	713
BT-69	8,25	2,01	3,03	5,96	691
BT-70	7,22	1,74	3,46	5,68	732
BT-71	6,11	1,59	4,09	6,12	630
BT-72	7,24	1,88	3,45	5,24	736
BT-73	7,08	1,85	3,53	4,93	776
BT-74	7,56	1,77	3,31	5,27	809
BT-75	8,57	1,70	2,92	6,08	831
BT-76	8,08	2,12	3,09	5,05	753
BT-77	8,31	2,04	3,01	5,14	793
BT-78	10,60	2,56	2,36	5,18	801
BT-79	11,13	2,79	2,25	5,10	782

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 12 motores testados se enquadram em quatro classes, conforme o intervalo de impulso total: $\frac{1}{2}A = 0,626$ a $1,25$ 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. 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).

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

- 1) O empuxo médio de todos os motores testados é $4,1$ N, ou 4 N ao se arredondar E_{med} para um número inteiro. Sua incerteza pode chegar a 43%.

- 2) São quase constantes em todos os motores: I_s (77 s); f_m (5,4 g/s); e c (750 m/s). Suas incertezas podem chegar a 29%.
- 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 34%.
- 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 28 e 52%.
- 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.

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

Motores	BT-68 a 71	BT-72 a 75	BT-76 a 79
Classe	A4	B4	C4
I_t (Ns)	1,32	4,00	5,66
U de I_t (Ns)	0,45	0,48	0,35
U de I_t (%)	34	12	6,1
Emed (N)	4,01	4,2	4,00
U de Emed (N)	0,47	1,8	0,46
U de Emed (%)	12	43	11
t_q (s)	0,327	0,95	1,41
U de t_q (s)	0,079	0,28	0,12
U de t_q (%)	24	29	8,6
I_s (s)	71	80	79,9
U de I_s (s)	14	13	6,7
U de I_s (%)	20	17	8,4
E_{max} (N)	7,1	7,6	9,5
U de E_{max} (N)	2,9	2,1	5,0
U de E_{max} (%)	41	28	52
f_m (g/s)	5,82	5,4	5,12
U de f_m (g/s)	0,86	1,6	0,18
U de f_m (%)	15	29	3,5
c (m/s)	690	790	782
U de c (m/s)	140	130	67
U de c (%)	20	17	8,5

A Tabela 6 mostra o efeito do número de testes sobre os valores médios e suas incertezas. Para cada tipo de motor, os dados de 4 testes referem-se àqueles de 22 de março de 2010; os de 6, aos de 28 de setembro de 2009; e os de 10, à composição de todos os testes. Da Tabela 6, destaca-se o seguinte para os 10 testes:

- 1) Em geral, ocorrem as menores incertezas; mas também pode ser com 6 testes, e às vezes até com 4 testes.
- 2) As incertezas de D_e ficam entre 1,6 e 2,1%, e 0,28 e 0,37 mm.
- 3) As incertezas de L_t ficam entre 0,58 e 0,85%, e 0,42 e 0,61 mm.
- 4) As incertezas de M_o e M_f ficam entre 3,8 e 8,3%, e 0,54 e 0,95 g.
- 5) As incertezas de M_p ficam entre 3,6 e 12%, e 0,22 e 0,60 g.

- 6) Em termos absolutos (g), em geral as incertezas de Mp são menores do que Mo e Mf. Porém, as incertezas relativas (%) de Mo e Mf estão entre a maior e a menor incerteza relativa de Mp.
- 7) O empuxo médio de todos os motores testados é 4,01 N, ou 4 N ao se arredondar Emed para um número inteiro. Sua incerteza pode chegar a 22%.
- 8) São quase constantes em todos os motores: Is (77,6 s); fm (5,30 g/s); e c (759 m/s). Suas incertezas podem chegar a 15%.

Tabela 6. Efeito do número de testes nos valores médios e suas incertezas.

Classe	----- A6 -----			----- B6 -----			----- C6 -----		
	4	6	10	4	6	10	4	6	10
De (mm)	17,30	17,44	17,38	17,33	17,33	17,33	17,45	17,49	17,47
U de De (mm)	0,33	0,28	0,28	0,74	0,31	0,37	0,49	0,41	0,34
U de De (%)	1,9	1,6	1,6	4,3	1,8	2,1	2,8	2,3	1,9
Lt (mm)	71,58	71,70	71,66	71,2	71,37	71,29	71,60	71,44	71,51
U de Lt (mm)	0,34	0,56	0,42	1,3	0,22	0,61	0,59	0,63	0,52
U de Lt (%)	0,47	0,78	0,58	1,8	0,32	0,85	0,83	0,88	0,72
Mo (g)	12,7	12,8	12,76	15,5	15,40	15,45	17,9	17,78	17,81
U de Mo (g)	1,5	1,1	0,95	1,3	0,69	0,71	1,4	0,47	0,67
U de Mo (%)	12	8,5	7,4	8,2	4,5	4,6	8,0	2,6	3,8
Mf (g)	10,8	10,9	10,86	10,45	10,54	10,50	10,6	10,55	10,57
U de Mf (g)	1,3	1,1	0,90	0,91	0,58	0,54	1,4	0,41	0,63
U de Mf (%)	12	9,7	8,3	8,8	5,5	5,2	13	3,9	5,9
Mp (g)	1,90	1,89	1,90	5,08	4,86	4,95	7,24	7,23	7,23
U de Mp (g)	0,37	0,25	0,22	0,48	0,78	0,60	0,40	0,30	0,26
U de Mp (%)	19	13	12	9,4	16	12	5,6	4,1	3,6
tq (s)	0,327	0,341	0,335	0,95	0,97	0,96	1,41	1,44	1,43
U de tq (s)	0,079	0,066	0,056	0,28	0,21	0,18	0,12	0,16	0,12
U de tq (%)	24	19	17	29	21	19	8,6	11	8,1
Emed (N)	4,01	3,98	3,99	4,2	3,94	4,06	4,00	3,96	3,98
U de Emed (N)	0,47	0,60	0,44	1,8	0,50	0,89	0,46	0,44	0,33
U de Emed (%)	12	15	11	43	13	22	11	11	8,4
E _{max} (N)	7,1	6,8	6,9	7,6	7,4	7,5	9,5	7,6	8,5
U de E _{max} (N)	2,9	1,2	1,5	2,1	2,1	1,7	5,0	3,5	3,8
U de tq (%)	41	18	21	28	29	22	52	46	45
It (Ns)	1,32	1,35	1,34	4,00	3,81	3,89	5,66	5,72	5,69
U de It (Ns)	0,45	0,15	0,21	0,48	0,63	0,51	0,35	0,56	0,37
U de It (%)	34	11	16	12	16	13	6,1	9,7	6,5
Is (s)	71	73,0	72,1	80	80,1	80,3	79,9	80,6	80,3
U de Is (s)	14	5,3	7,4	13	5,9	6,7	6,7	5,6	4,5
U de Is (%)	20	7,2	10	17	7,4	8,4	8,4	6,9	5,6
fm (g/s)	5,82	5,57	5,67	5,4	5,02	5,16	5,12	5,02	5,06
U de fm (g/s)	0,86	0,67	0,63	1,6	0,32	0,80	0,18	0,36	0,26
U de fm (%)	15	12	11	29	6,4	15	3,5	7,2	5,1
c (m/s)	690	715	706	790	784	786	782	789	786
U de c (m/s)	140	52	72	130	58	66	67	54	44
U de c (%)	20	7,3	10	17	7,3	8,4	8,5	6,9	5,6

(g = 9,7876 m/s²)

- 9) O tempo de queima (tq) e o impulso total (It) são quase lineares com a massa de propelente (Mp). Suas incertezas podem chegar a 19%.
- 10) Considerando-se os itens 7 a 9, conclui-se que o grão-propelente é quase de geometria cilíndrica, sem perfuração, com queima do tipo cigarro.
- 11) As incertezas de E_{max} ficam entre 21 e 45%.

A Tabela 7 apresenta resultados de alguns motores, de três fabricantes dos Estados Unidos, certificados pela NAR (2009), bem como os resultados dos motores BT para 10 testes. 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 7. 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	1,337	4,33	4,63	3,89	8,82	8,85	5,69
σ de It (Ns)	0,05	0,03	0,094	0,08	0,15	0,22	0,18	0,21	0,16
σ de It (%)	2,0	1,3	7,0	1,8	3,2	5,7	2,0	2,4	2,8
tq (s)	1,31	0,55	0,335	0,86	0,75	0,962	1,86	2,24	1,430
σ de tq (s)	0,06	0,01	0,025	0,15	0,07	0,079	0,31	0,04	0,050
σ de tq (%)	4,6	1,8	7,5	17	9,3	8,2	17	1,8	3,5
E _{max} (N)	4,82	10,07	6,88	12,14	14,38	7,51	14,09	23,30	8,5
σ de E _{max} (N)	1,00	0,14	0,65	1,57	1,15	0,73	2,94	0,82	1,7
σ de E _{max} (%)	21	1,4	9,4	13	8,0	9,7	21	3,5	20
E _{med2} (N)	1,89	4,18	3,99	5,03	6,17	4,04	4,74	3,95	3,98
Δ E _{med2} (N)	?	0,17	0,43	?	?	1,01	?	?	0,23
Δ E _{med2} (%)	?	4,1	11	?	?	25	?	?	5,8
M _p (g)	3,0	3,5	1,895	5,6	6,5	4,95	10,8	12,0	7,23
I _s (s)	84	67	72,1	79	73	80,3	83	75	80,3

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

Da Tabela 7, destaca-se o seguinte:

- 1) O desvio-padrão do impulso total (It) dos motores BT do tipo B6 e C6 fica entre 2,8 e 5,7%, e os demais motores entre 1,3 e 3,2%. Portanto, os motores BT destas duas classes (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, que é o caso dos resultados dos motores BT mostrados na Tabela 7. Mas os motores BT do tipo A6 não atendem exatamente à norma NFPA 1125 (2007) em relação a It pois o desvio-padrão deles é um pouco maior do que 6,7%, sendo 7,0%.
- 2) O desvio-padrão do tempo de queima (tq) dos motores BT fica entre 3,5 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 9,4 e 20%, e os demais motores entre 1,4 e 21%.

- 4) O impulso específico (I_s) dos motores BT fica entre 72 e 80 s, e os demais motores entre 67 e 84 s.
- 5) A variação máxima do empuxo médio (ΔE_{med2}) de cada classe de motor BT é de no máximo 1,01 N. Portanto, os motores BT atendem a um dos requisitos da norma NFPA 1125 (2007), que é ΔE_{med2} ser menor do que 1 N. Para cada classe de motor, ΔE_{med2} é a variação máxima entre os valores de E_{med2} (razão entre o I_t e o t_q dos valores da Tabela 6 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 (I_t , t_q , E_{max} , I_s e ΔE_{med2}), e atendem a dois requisitos da norma NFPA 1125; apenas estes dois requisitos foram possíveis de serem avaliados com os testes realizados.

5 CONCLUSÃO

Com base nos 30 testes estáticos relatados neste trabalho, verificou-se que:

- 1) As incertezas (U) de D_e e L_t podem chegar a 2,1%.
- 2) As incertezas de M_o e M_f podem chegar a 8,3%, e as de M_p a 12%.
- 3) O empuxo médio de todos os motores testados é 4,01 N, ou 4 N ao se arredondar E_{med} para um número inteiro. Sua incerteza pode chegar a 22%.
- 4) São quase constantes em todos os motores: I_s (77,6 s); f_m (5,30 g/s); e c (759 m/s). Suas incertezas podem chegar a 15%.
- 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 19%.
- 6) As incertezas de E_{max} ficam entre 21 e 45%.
- 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 (I_t , t_q , E_{max} , I_s e ΔE_{med2}), e atendem a dois requisitos da norma NFPA 1125 (2007).
- 10) O aumento de seis para dez testes estáticos de cada motor, em geral, resultou na queda do valor da incerteza dos parâmetros dos motores.

Agradecimentos

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

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 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/> (2010).

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 28 Set 2009 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 (2010).

www.thrustcurve.org (2010).

APÊNDICE A – curvas de empuxo x tempo

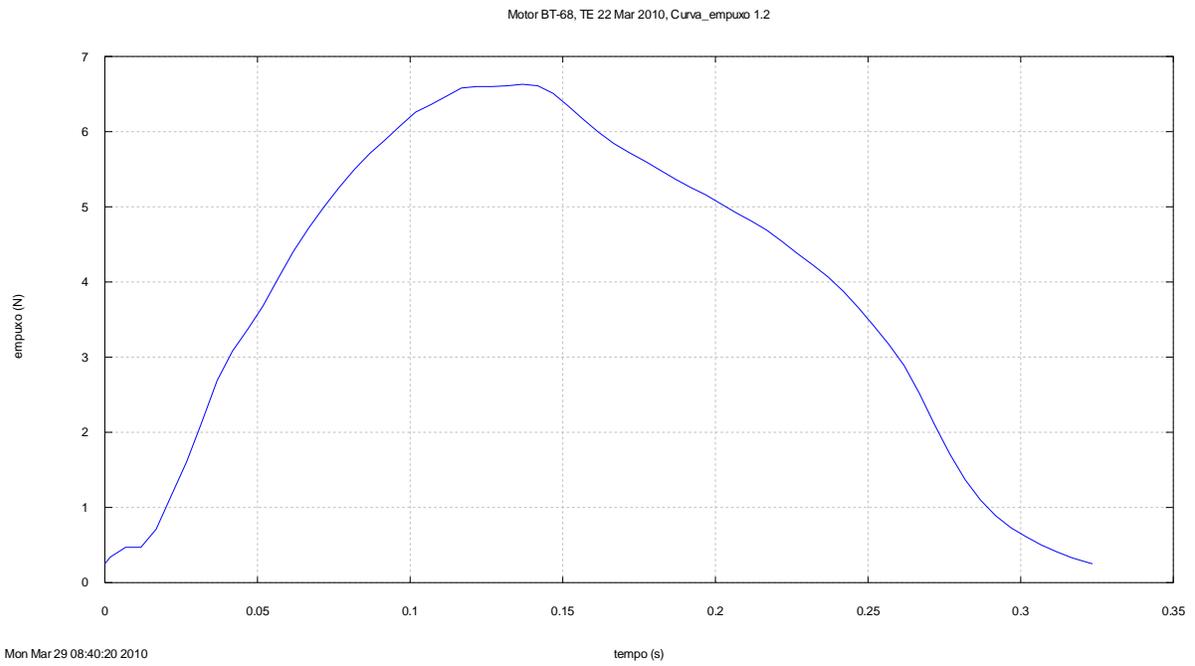


Figura A1. Curva empuxo *versus* tempo processada do motor-foguete BT-68.

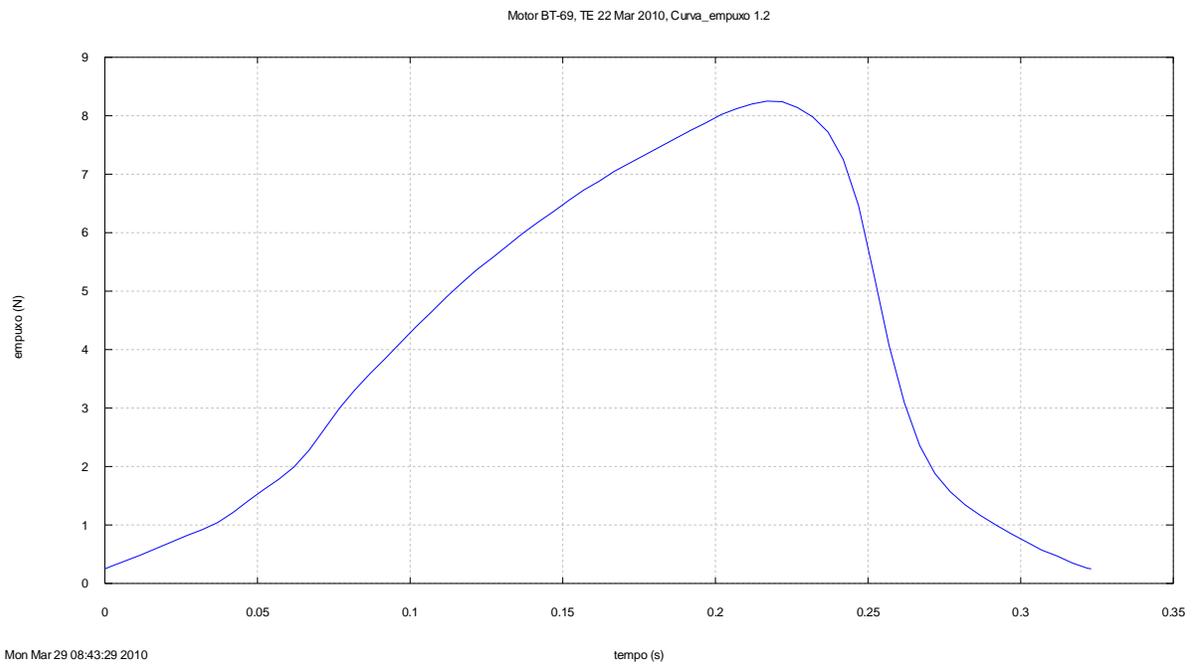


Figura A2. Curva empuxo *versus* tempo processada do motor-foguete BT-69.

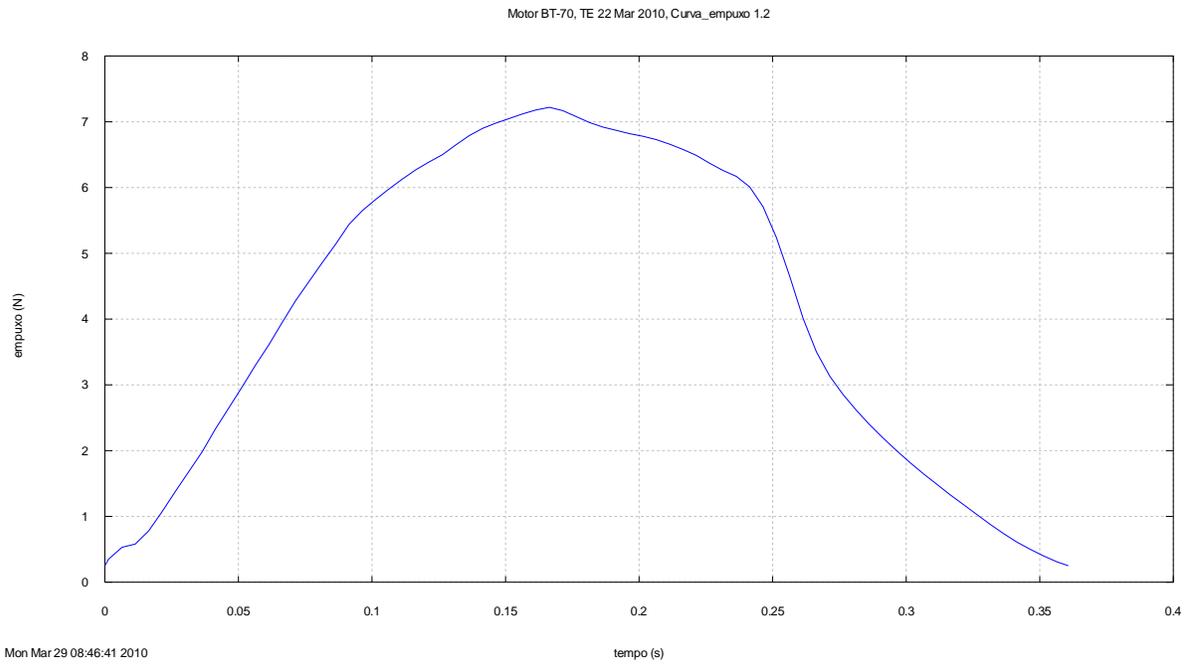


Figura A3. Curva empuxo *versus* tempo processada do motor-foguete BT-70.

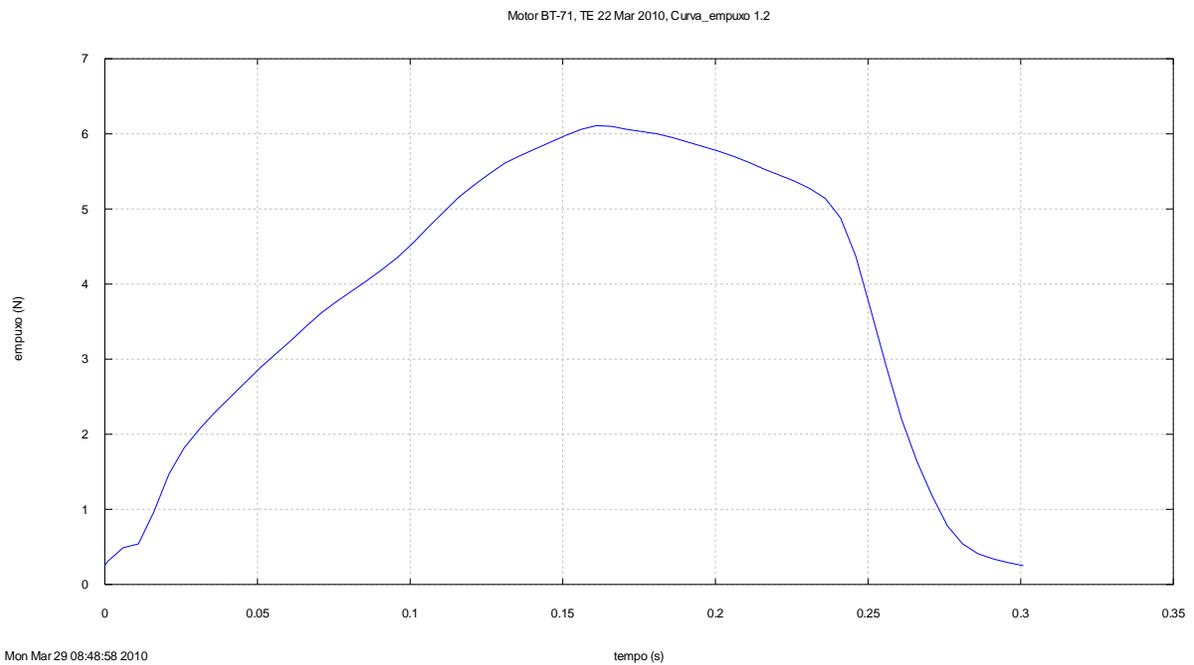


Figura A4. Curva empuxo *versus* tempo processada do motor-foguete BT-71.

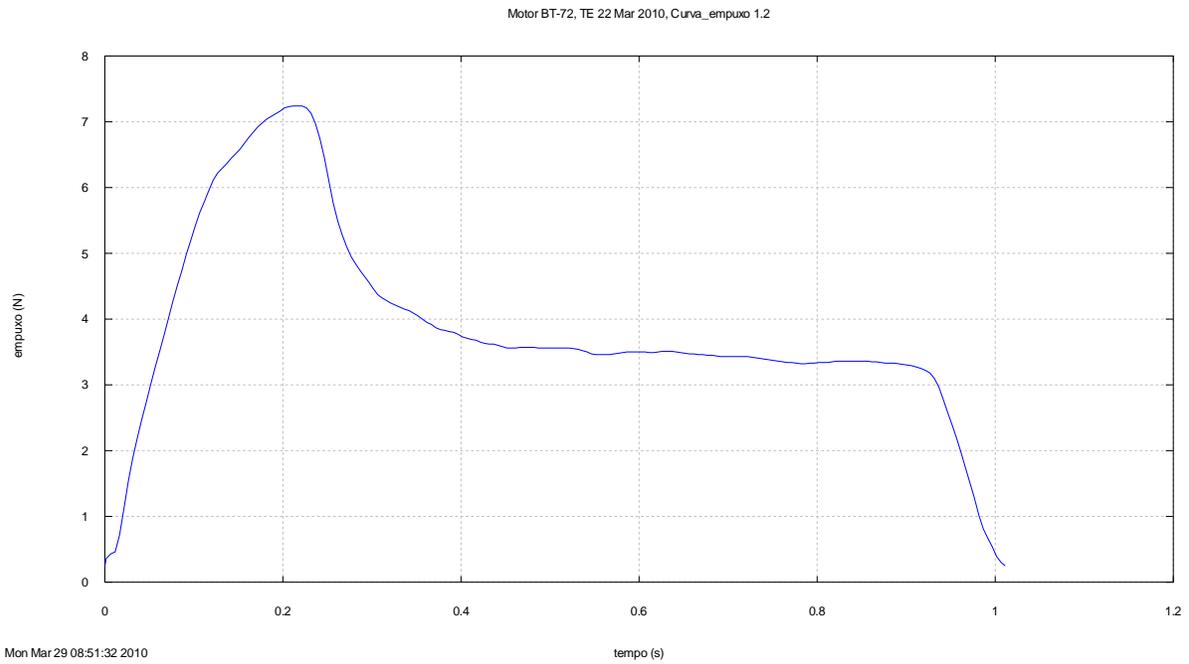


Figura A5. Curva empuxo *versus* tempo processada do motor-foguete BT-72.

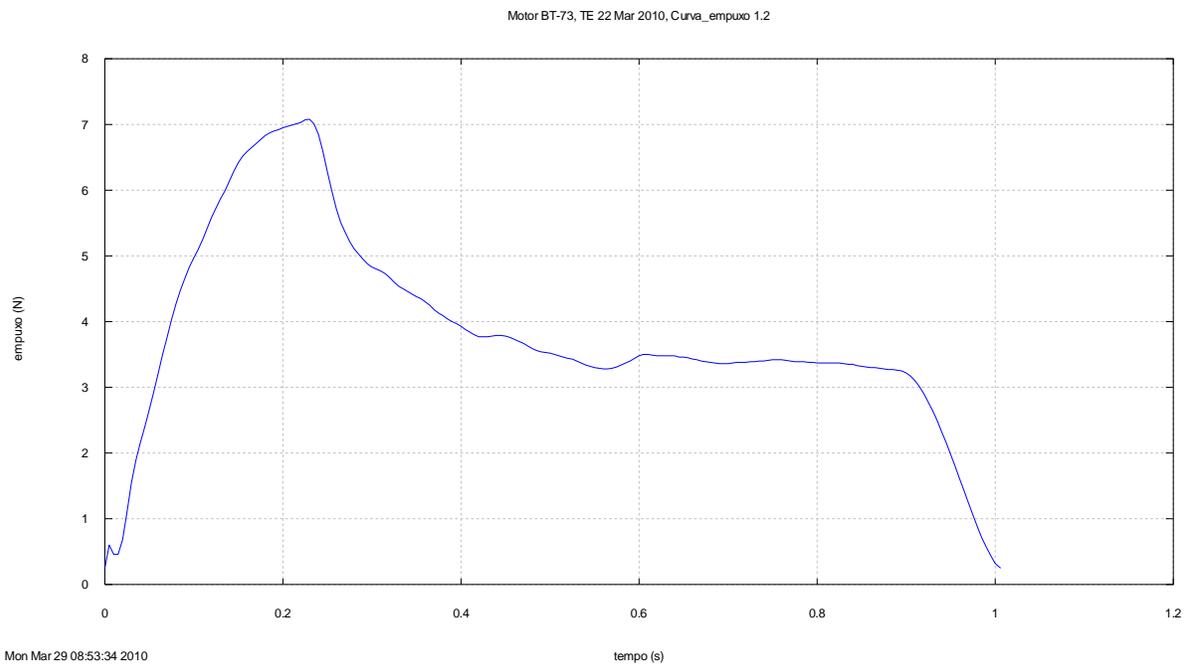


Figura A6. Curva empuxo *versus* tempo processada do motor-foguete BT-73.

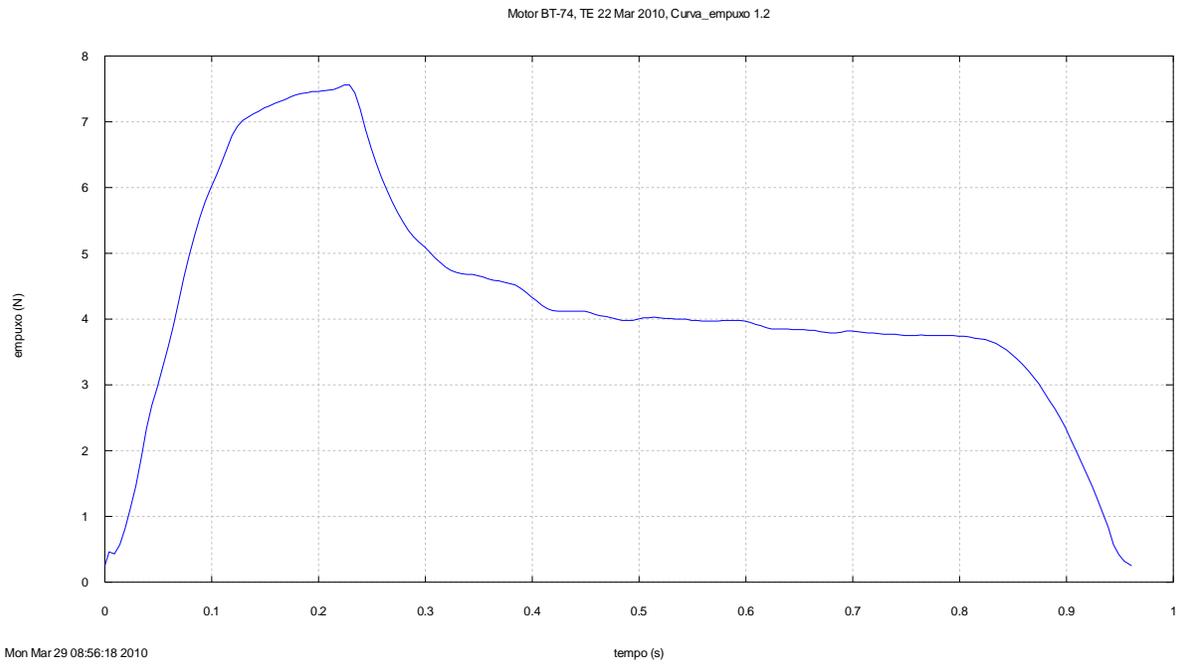


Figura A7. Curva empuxo *versus* tempo processada do motor-foguete BT-74.

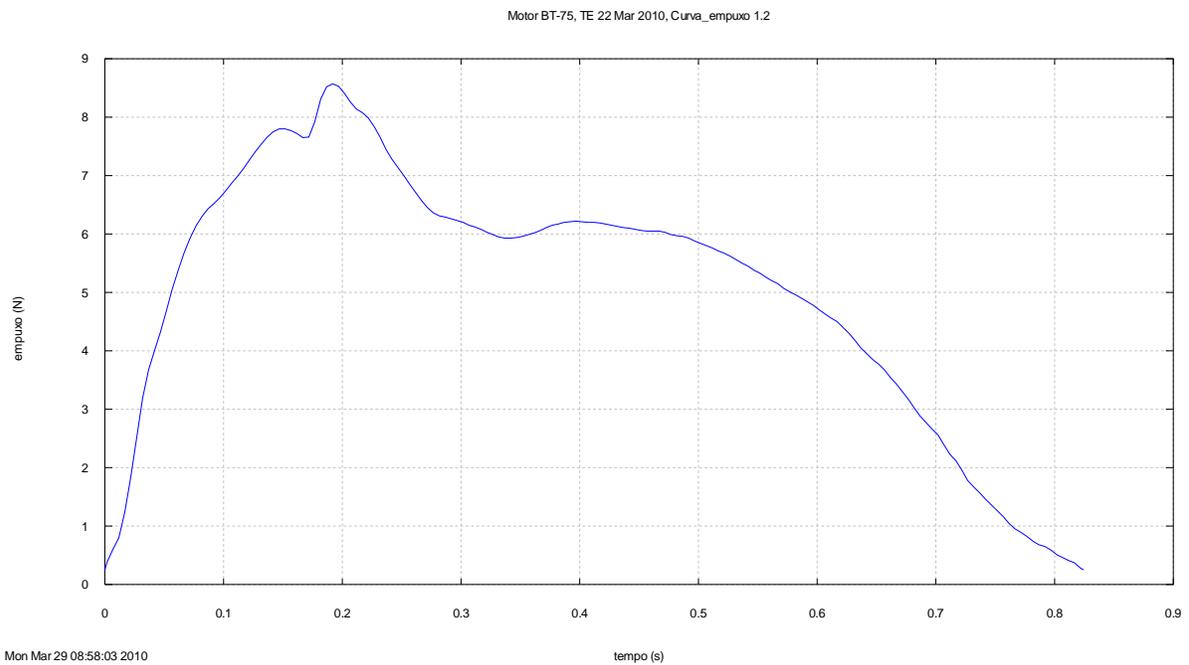


Figura A8. Curva empuxo *versus* tempo processada do motor-foguete BT-75.

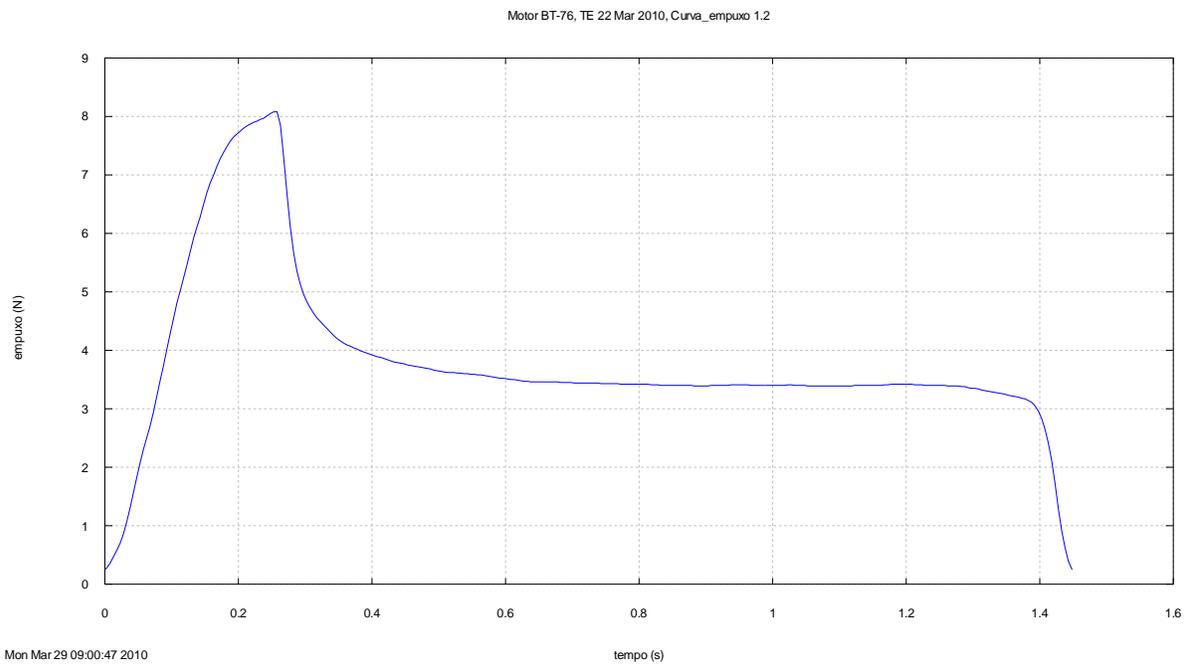


Figura A9. Curva empuxo *versus* tempo processada do motor-foguete BT-76.

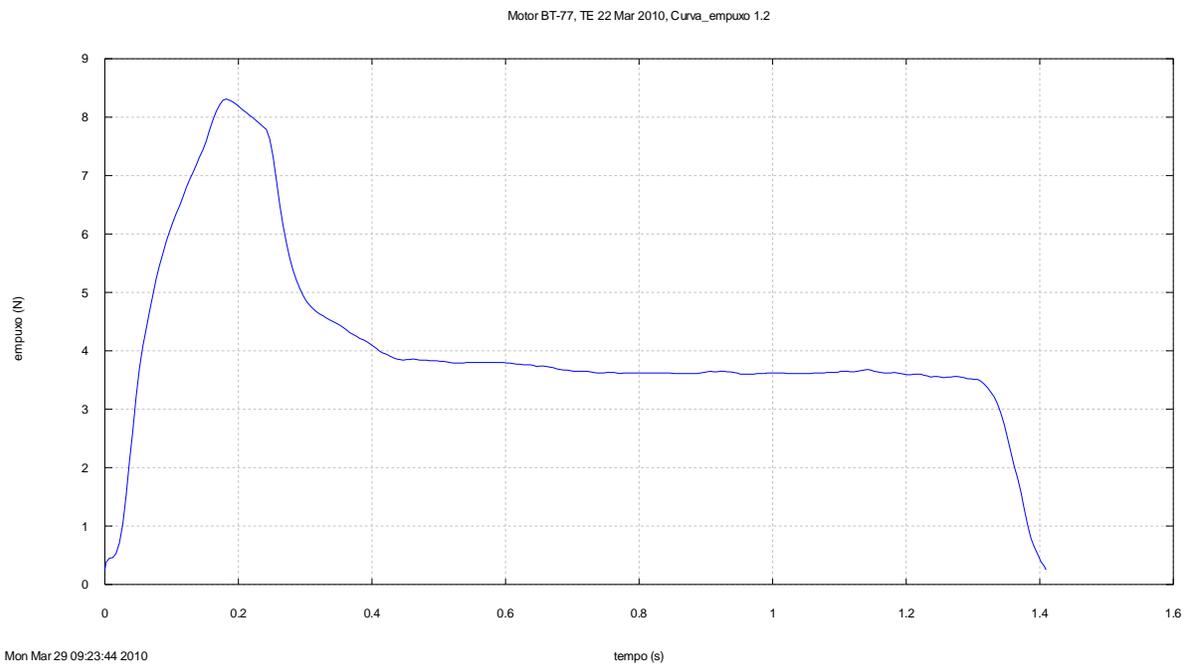


Figura A10. Curva empuxo *versus* tempo processada do motor-foguete BT-77.

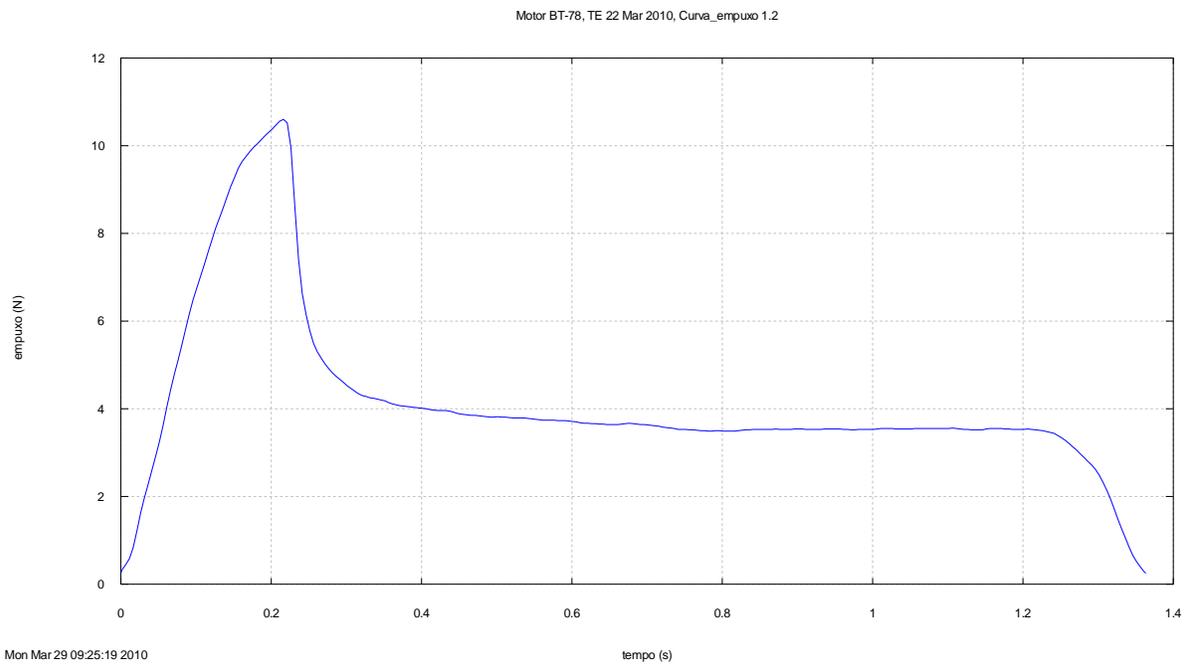


Figura A11. Curva empuxo versus tempo processada do motor-foguete BT-78.

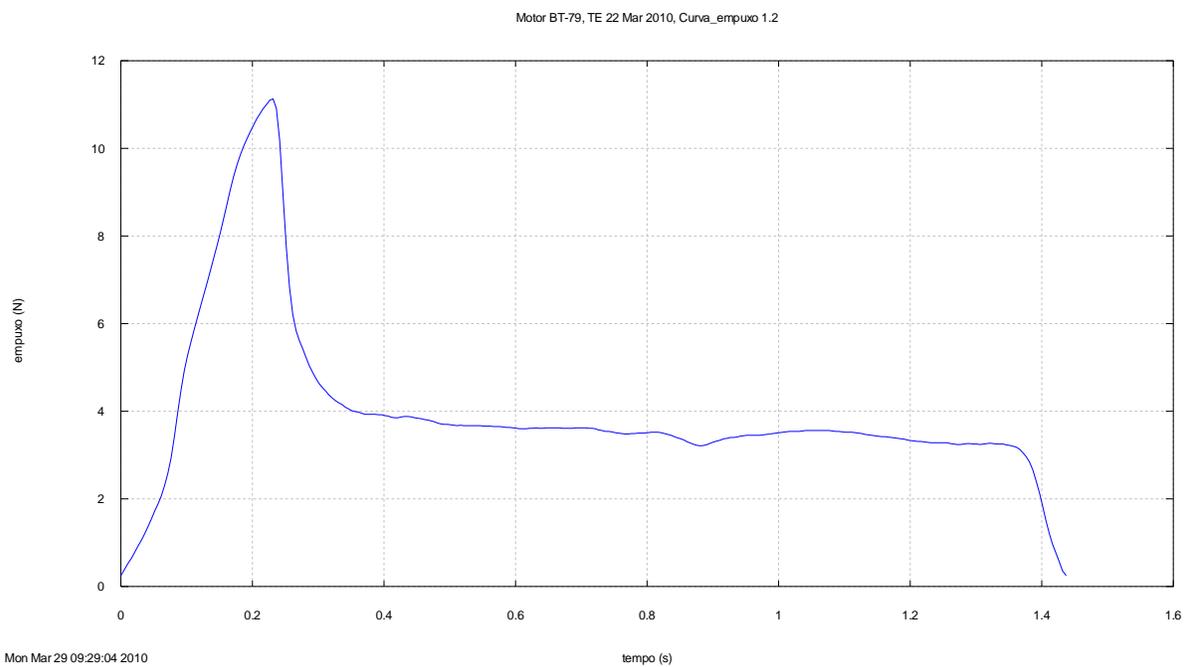


Figura A12. Curva empuxo versus tempo processada do motor-foguete BT-79.

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-79

```
'bt79.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)
  7.332d-3 ..... M       = Massa de propelente (kg)
  9.7876d0 ..... g       = Aceleração gravitacional local (m/s2)
'curva_empuxo_lp2_BT-79_saida.txt' ..... caso = nome do arquivo de saída principal
'Motor BT-79, TE 22 Mar 2010, Curva_empuxo 1.2' ! titulo = título de identificação da análise
```

APÊNDICE D – Resultados do aplicativo Curva_Empuxo 1.2 para o motor BT-79

Saída do programa CURVA_EMPUXO 1.2, versão de 9 Nov 2008

Caso = curva_empuxo_lp2_BT-79_saida.txt

Título = Motor BT-79, TE 22 Mar 2010, Curva_empuxo 1.2

*** CURVA EMPUXO X TEMPO ***

t (s)	empuxo (N)
0.0000	0.25
0.0014	0.28
0.0064	0.41
0.0114	0.54
0.0164	0.65
0.0214	0.79
0.0264	0.93
0.0314	1.06
0.0364	1.21
0.0414	1.37
0.0464	1.54
0.0514	1.72
0.0564	1.88
0.0614	2.06
0.0664	2.30
0.0714	2.58
0.0764	2.94
0.0814	3.42
0.0864	3.97
0.0914	4.48
0.0964	4.93
0.1014	5.27
0.1064	5.57
0.1114	5.86
0.1164	6.14
0.1214	6.41
0.1264	6.68
0.1314	6.95
0.1364	7.23
0.1414	7.51
0.1464	7.79
0.1514	8.09
0.1564	8.41
0.1614	8.73
0.1664	9.06
0.1714	9.36
0.1764	9.62
0.1814	9.84
0.1864	10.04
0.1914	10.21
0.1964	10.37
0.2014	10.52
0.2064	10.67
0.2114	10.79
0.2164	10.91
0.2214	11.00
0.2264	11.10
0.2314	11.13
0.2364	10.91
0.2414	10.19
0.2464	8.97
0.2514	7.76
0.2564	6.82
0.2614	6.21
0.2664	5.84
0.2714	5.61
0.2764	5.43
0.2814	5.23
0.2864	5.04
0.2914	4.89
0.2964	4.75
0.3014	4.63
0.3064	4.54
0.3114	4.46
0.3164	4.37
0.3214	4.30

0.3264	4.24
0.3314	4.19
0.3364	4.15
0.3414	4.09
0.3464	4.05
0.3514	4.01
0.3564	3.99
0.3614	3.98
0.3664	3.95
0.3714	3.93
0.3764	3.93
0.3814	3.93
0.3864	3.93
0.3914	3.92
0.3964	3.92
0.4014	3.90
0.4064	3.89
0.4114	3.86
0.4164	3.85
0.4214	3.85
0.4264	3.87
0.4314	3.88
0.4364	3.88
0.4414	3.87
0.4464	3.85
0.4514	3.84
0.4564	3.83
0.4614	3.81
0.4664	3.80
0.4714	3.78
0.4764	3.76
0.4814	3.73
0.4864	3.71
0.4914	3.70
0.4964	3.70
0.5014	3.69
0.5064	3.68
0.5114	3.67
0.5164	3.68
0.5214	3.67
0.5264	3.67
0.5314	3.67
0.5364	3.67
0.5414	3.67
0.5464	3.67
0.5514	3.66
0.5564	3.66
0.5614	3.66
0.5664	3.65
0.5714	3.65
0.5764	3.65
0.5814	3.64
0.5864	3.63
0.5914	3.63
0.5964	3.62
0.6014	3.61
0.6064	3.60
0.6114	3.60
0.6164	3.60
0.6214	3.61
0.6264	3.61
0.6314	3.62
0.6364	3.61
0.6414	3.61
0.6464	3.62
0.6514	3.62
0.6564	3.62
0.6614	3.62
0.6664	3.62
0.6714	3.61
0.6764	3.61
0.6814	3.61
0.6864	3.61
0.6914	3.62
0.6964	3.62
0.7014	3.62
0.7064	3.62
0.7114	3.61
0.7164	3.61
0.7214	3.60

0.7264	3.57
0.7314	3.56
0.7364	3.54
0.7414	3.54
0.7464	3.53
0.7514	3.51
0.7564	3.50
0.7614	3.49
0.7664	3.48
0.7714	3.48
0.7764	3.49
0.7814	3.49
0.7864	3.50
0.7914	3.50
0.7964	3.50
0.8014	3.51
0.8064	3.52
0.8114	3.52
0.8164	3.52
0.8214	3.51
0.8264	3.49
0.8314	3.47
0.8364	3.45
0.8414	3.42
0.8464	3.39
0.8514	3.37
0.8564	3.34
0.8614	3.30
0.8664	3.27
0.8714	3.24
0.8764	3.22
0.8814	3.21
0.8864	3.22
0.8914	3.24
0.8964	3.27
0.9014	3.30
0.9064	3.32
0.9114	3.34
0.9164	3.37
0.9214	3.38
0.9264	3.40
0.9314	3.40
0.9364	3.41
0.9414	3.43
0.9464	3.44
0.9514	3.45
0.9564	3.45
0.9614	3.45
0.9664	3.45
0.9714	3.45
0.9764	3.46
0.9814	3.47
0.9864	3.48
0.9914	3.49
0.9964	3.50
1.0014	3.51
1.0064	3.52
1.0114	3.53
1.0164	3.54
1.0214	3.54
1.0264	3.54
1.0314	3.54
1.0364	3.55
1.0414	3.56
1.0464	3.56
1.0514	3.56
1.0564	3.56
1.0614	3.56
1.0664	3.56
1.0714	3.56
1.0764	3.56
1.0814	3.55
1.0864	3.54
1.0914	3.54
1.0964	3.53
1.1014	3.52
1.1064	3.52
1.1114	3.52
1.1164	3.51
1.1214	3.50

1.1264	3.49
1.1314	3.47
1.1364	3.46
1.1414	3.45
1.1464	3.44
1.1514	3.43
1.1564	3.42
1.1614	3.42
1.1664	3.41
1.1714	3.40
1.1764	3.39
1.1814	3.38
1.1864	3.37
1.1914	3.36
1.1964	3.34
1.2014	3.33
1.2064	3.32
1.2114	3.31
1.2164	3.31
1.2214	3.30
1.2264	3.29
1.2314	3.28
1.2364	3.28
1.2414	3.28
1.2464	3.28
1.2514	3.28
1.2564	3.28
1.2614	3.26
1.2664	3.25
1.2714	3.24
1.2764	3.24
1.2814	3.25
1.2864	3.26
1.2914	3.26
1.2964	3.25
1.3014	3.25
1.3064	3.24
1.3114	3.25
1.3164	3.26
1.3214	3.27
1.3264	3.26
1.3314	3.25
1.3364	3.25
1.3414	3.25
1.3464	3.23
1.3514	3.22
1.3564	3.20
1.3614	3.18
1.3664	3.13
1.3714	3.05
1.3764	2.96
1.3814	2.84
1.3864	2.66
1.3914	2.41
1.3964	2.14
1.4014	1.83
1.4064	1.50
1.4114	1.21
1.4164	0.96
1.4214	0.77
1.4264	0.57
1.4314	0.36
1.4364	0.26
1.4373	0.25

*** Motor BT-79, TE 22 Mar 2010, Curva_empuxo 1.2 ***

7.33 = massa de propelente (g)

9.7876 = aceleração gravitacional local (m/s²)

0.25 = empuxo mínimo (N)

11.13 = empuxo máximo (N)

6.000 = tempo original do empuxo máximo (s)

0.231 = tempo corrigido do empuxo máximo (s)

5.769 = tempo original inicial (s)

7.206 = tempo original final (s)
1.437 = tempo de queima (s)
5.73 = impulso total (Ns)
3.99 = empuxo médio (N)
781.9 = velocidade de exaustão efetiva média (m/s)
79.9 = impulso específico médio (s)
5.10 = fluxo de massa médio (g/s)
2.79 = razão empuxo máximo / empuxo médio
2.25 = razão empuxo mínimo / empuxo máximo (%)
classificação do motor = C 4