



## *Testes estáticos de 27 Jul e 13 Set 2010 de motores-foguete do tipo BT 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, 8 de outubro de 2010.

## 1 INTRODUÇÃO

Este relatório descreve 52 testes estáticos com motores-foguete de espaçomodelos a propelente sólido do tipo BT (Bandeirante). Foram realizados 40 testes em 27 de julho de 2010 e mais 12 testes em 13 de setembro de 2010, na Universidade Federal do Paraná. Estes testes 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 tipos de motores-foguete do tipo BT (A6-0, B6-0 e C6-0); (2) determinar o tempo entre a ignição e a ejeção de motores-foguete do tipo BT da classe C6-5; e (3) verificar a incerteza do desempenho destes motores.

## 2 DESCRIÇÃO DOS MOTORES-FOGUETE

As Figuras 1 a 4 mostram oito fotos dos 52 motores-foguete testados. 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). A estrutura externa de cada motor é um tubo de papelão cilíndrico circular. Internamente, os motores A6-0, B6-0 e C6-0 têm uma tubeira, carga propulsora de pólvora negra e tampa de fechamento; eles são motores do tipo *booster*. Os motores C6-5 têm uma tubeira, carga propulsora de pólvora negra, carga temporizadora, carga ejetora e tampa de fechamento. A coluna Fabricado na Tabela 1 indica a data de fabricação dos motores pela Bandeirante (Boa Vista Modelismo Ltda.), de São Lourenço da Mata (PE).



**Figura 1. Fotos mostrando os motores-foguete BT do tipo A6-0.**

A Tabela 1 apresenta os seguintes dados sobre cada motor-foguete testado:  $De$  = diâmetro externo;  $Lt$  = comprimento total;  $Mo$  = massa total do motor antes da queima do propelente;  $Mf$  = massa total do motor depois da queima do propelente; e  $Mp$  = massa de propelente. Cada valor de  $De$  e  $Lt$  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 5).  $Mo$  e  $Mf$  foram

medidos com uma balança Marte AY220 (Figura 6), 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. No caso dos motores C6-5,  $M_p$  indica a massa total consumida das cargas propulsora, temporizadora e ejetora, além da tampa de fechamento que é ejetada.



Figura 2. Fotos mostrando os motores-foguete BT do tipo B6-0.



Figura 3. Fotos mostrando os motores-foguete BT do tipo C6-0.



Figura 4. Fotos mostrando os motores-foguete BT do tipo C6-5.

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	Fabricado	Motor	De (mm)	Lt (mm)	Mo (g)	Mf (g)	Mp (g)
A6-0	Abr/10	BT-80	17,47	81,08	16,920	14,547	2,373
		BT-81	17,44	82,26	15,480	13,251	2,229
		BT-82	17,49	82,93	17,114	14,615	2,499
		BT-83	17,43	82,46	16,388	14,087	2,301
		BT-84	17,53	81,87	15,804	13,448	2,356
		BT-85	17,49	83,35	16,314	13,810	2,504
		BT-86	17,52	81,78	15,608	13,230	2,378
		BT-87	17,48	81,67	15,592	13,199	2,393
		BT-88	17,42	82,70	16,710	14,360	2,350
		BT-120	17,65	81,92	16,738	13,941	2,797
		BT-124	17,46	82,82	15,926	13,198	2,728
		BT-128	17,49	82,33	15,414	12,314	3,100
B6-0	Abr/10	BT-90	17,87	70,17	17,117	12,849	4,268
		BT-91	17,71	71,22	17,431	12,617	4,814
		BT-92	17,63	69,40	17,503	12,407	5,096
		BT-93	17,89	69,56	17,048	12,381	4,667
		BT-94	17,62	70,70	17,438	12,669	4,769
		BT-96	17,34	71,04	17,271	12,328	4,943
		BT-97	17,38	70,98	17,573	12,265	5,308
		BT-98	17,58	70,18	16,984	12,622	4,362
		BT-99	17,57	71,09	17,025	11,950	5,075
		BT-121	17,51	69,97	17,149	11,923	5,226
		BT-125	17,55	70,40	17,126	12,063	5,063
		BT-129	17,39	69,52	17,168	11,940	5,228
C6-0	Abr/10	BT-100	17,61	78,54	22,607	13,012	9,595
		BT-101	17,90	78,62	23,127	13,644	9,483
		BT-102	17,55	78,70	23,118	12,958	10,160
		BT-103	17,47	77,10	21,522	12,414	9,108
		BT-105	17,62	79,09	22,956	13,531	9,425
		BT-106	17,58	75,93	22,890	12,845	10,045
		BT-107	17,39	80,04	22,409	12,817	9,592
		BT-108	17,38	79,83	22,208	12,776	9,432
		BT-109	17,39	78,85	21,847	12,643	9,204
		BT-122	17,37	77,19	22,856	12,885	9,971
		BT-126	17,64	77,77	21,998	11,511	10,487
		BT-130	17,02	76,92	19,912	10,692	9,220
C6-5	Fev/10	BT-110	17,70	77,92	23,050	11,692	11,358
		BT-111	17,66	80,30	23,212	12,071	11,141
		BT-112	17,16	76,93	22,134	10,372	11,762
		BT-113	17,71	79,19	22,745	11,823	10,922
		BT-114	17,09	78,86	21,595	10,366	11,229
		BT-115	17,78	78,92	23,369	11,952	11,417
		BT-116	17,35	78,41	20,461	10,333	10,128
		BT-117	17,73	80,72	23,578	12,346	11,232
		BT-118	17,82	81,12	23,277	12,114	11,163
		BT-119	17,70	79,50	22,581	12,131	10,450
		BT-123	17,81	78,91	23,606	11,715	11,891
		BT-127	17,47	80,64	22,986	11,651	11,335
BT-131	17,87	79,32	23,285	11,861	11,424		

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

<b>Motores</b>	<b>A6-0</b>	<b>B6-0</b>	<b>C6-0</b>	<b>C6-5</b>
De (mm)	17,49	17,59	17,49	17,60
U de De (mm)	0,13	0,39	0,47	0,56
U de De (%)	0,76	2,2	2,7	3,2
Lt (mm)	82,3	70,4	78,2	79,3
U de Lt (mm)	1,4	1,4	2,7	2,6
U de Lt (%)	1,7	2,0	3,5	3,3
Mo (g)	16,2	17,24	22,3	22,8
U de Mo (g)	1,3	0,44	2,0	2,0
U de Mo (%)	8,2	2,6	9,0	8,6
Mf (g)	13,7	12,33	12,6	11,6
U de Mf (g)	1,5	0,70	1,8	1,6
U de Mf (%)	11	5,6	14	14
Mp (g)	2,50	4,90	9,64	11,2
U de Mp (g)	0,55	0,74	0,94	1,0
U de Mp (%)	22	15	9,8	9,3

**Figura 5. Fotos mostrando o paquímetro digital Lee Tools usado nas medições.**

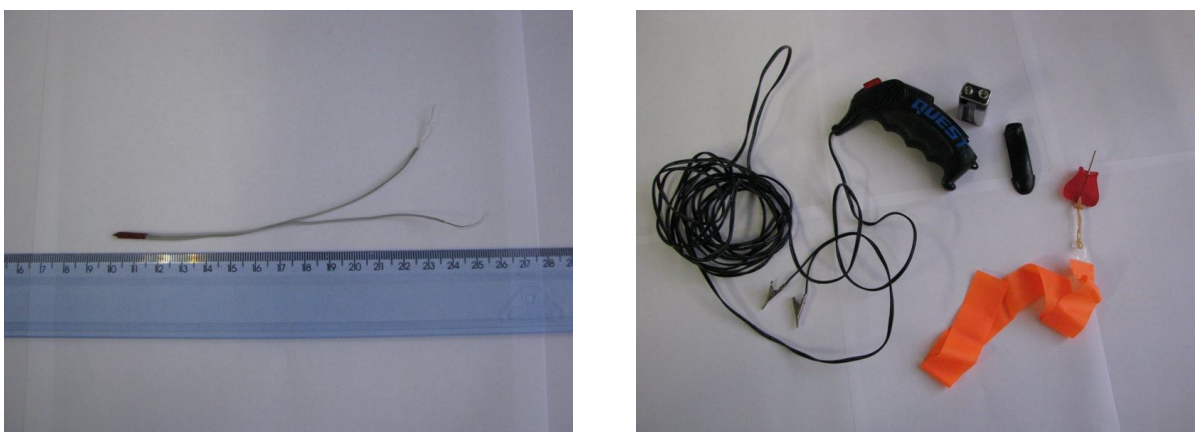
### **3 DESCRIÇÃO DOS TESTES ESTÁTICOS**

Os 52 testes estáticos foram realizados 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). Em 27 de julho de 2010 foram executados: 31 testes entre 8:54 e 10:39 h, quando a temperatura ambiente variou entre 13,4 e 15,0 °C e a pressão atmosférica entre 91,71 e 91,78 kPa; e 9 testes entre 14:27 e 14:46 h, quando a temperatura ambiente variou entre 15,6 e 16,3 °C e a pressão atmosférica entre 91,53 e 91,55 kPa. Em 13 de setembro de 2010 foram executados mais 12 testes entre 13:56 e 16:15 h, quando a temperatura ambiente variou entre 24,8 e 25,9 °C e a pressão atmosférica entre 90,42 e 90,51 kPa. As temperaturas e pressões foram medidas com o altímetro RA123 da Oregon Venture (Figura 6).





**Figura 6. Fotos mostrando a balança e o medidor de temperatura e pressão usados.**



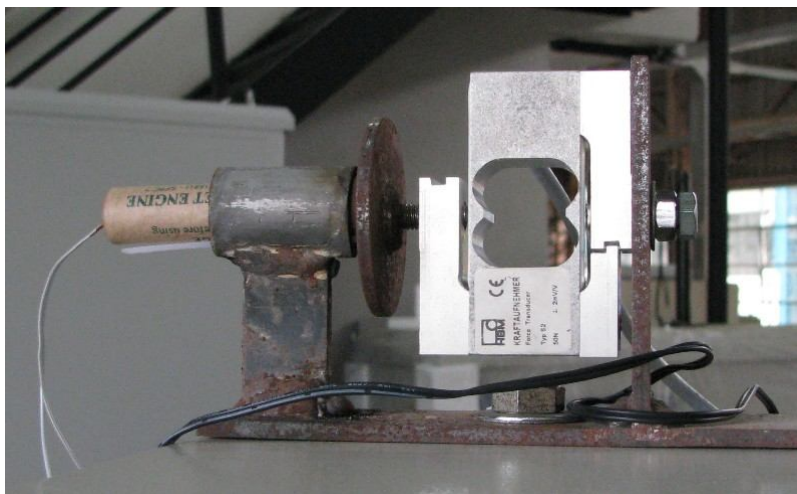
**Figura 7. Fotos mostrando o tipo de ignitor e o sistema de ignição usados nos testes.**

Foram empregados ignitores fabricados em outubro de 2008, agosto de 2009 e maio de 2010 pela Bandeirante (Figura 7). 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 7).

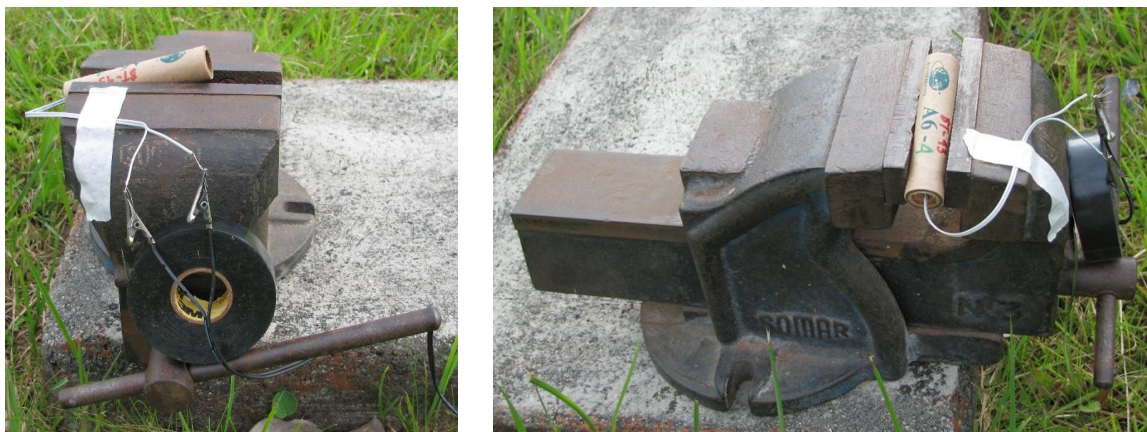
A bancada experimental usada durante cada teste estático dos motores A6-0, B6-0 e C6-0 pode ser vista na Figura 8. Nesta figura, também é mostrada a célula de carga empregada, que é do tipo S2, de 50 N, da HBM (Hottinger Baldwin Messtechnik GmbH), cuja classe de acurácia é de

0,025 N. O sistema de aquisição de dados utilizado foi o Spider 8 da HBM, com o aplicativo computacional Catman 4.5. Em 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 8.

No caso dos motores C6-5, eles foram presos a uma morsa, como é mostrado na Figura 9. A queima foi filmada e os resultados obtidos da análise das imagens.



**Figura 8.** Foto da bancada experimental usada com os motores A6-0, B6-0 e C6-0, mostrando a célula de carga S2-50 da HBM e um motor preparado para o teste estático, já com o seu ignitor.



**Figura 9.** Fotos mostrando a forma de fixação usada nos testes dos motores C6-5.

Durante o teste estático dos motores BT-89 (A6-0), BT-95 (B6-0) e BT-104 (C6-0) ocorreu algum problema com a aquisição dos dados de empuxo. Desta forma, não são apresentadas informações sobre estes motores neste relatório.

## **4 RESULTADOS**

As Figuras 10 a 15 mostram alguns motores BT durante a realização de seus testes estáticos. As imagens deste relatório foram captadas por uma câmera fotográfica Canon PowerShot S51S, de 8 megapixels (Figuras 1 a 9), e por uma filmadora Sony HDR-SR10, de 4 megapixels (Figuras 10 a 15) com velocidade de aquisição de imagens de 30 quadros por segundo, resultando em 0,033 s o intervalo de tempo entre duas imagens consecutivas.



**Figura 10. Foto mostrando o motor BT-80 (A6-0) durante o seu teste estático.**



**Figura 11. Foto mostrando o motor BT-90 (B6-0) durante o seu teste estático.**

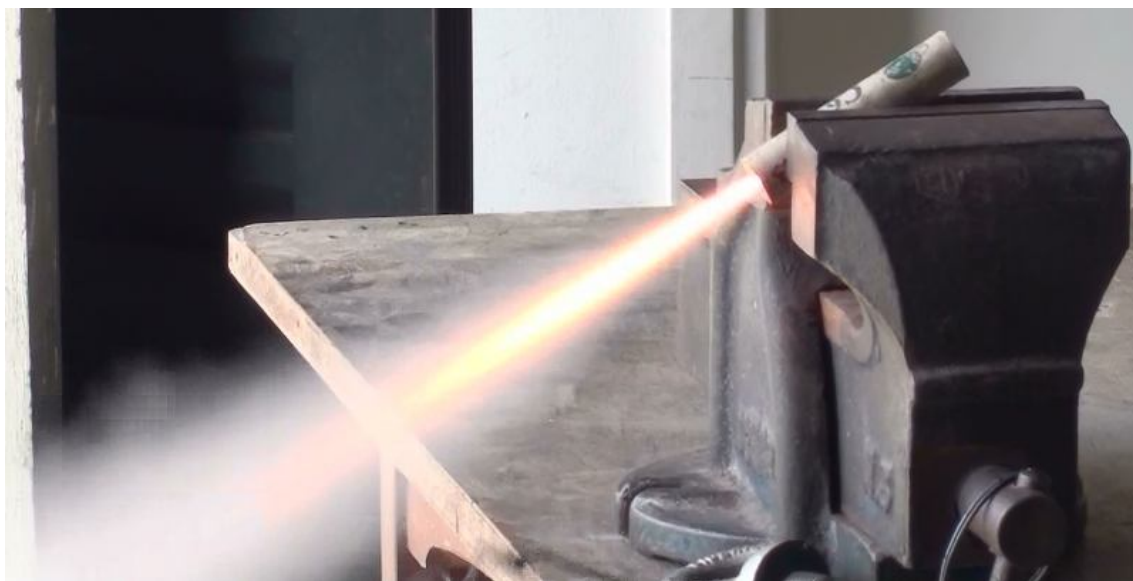


**Figura 12. Foto mostrando o motor BT-100 (C6-0) durante o seu teste estático.**

As Figuras A1 a A36, 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](http://www.thrustcurve.org) (2010).



**Figura 13. Foto mostrando o motor BT-123 (C6-5) durante a queima da sua carga propulsora.**



**Figura 14. Foto mostrando o motor BT-123 (C6-5) durante a queima da sua carga temporizadora.**



**Figura 15. Foto mostrando o motor BT-123 (C6-5) durante a queima da sua carga ejetora.**

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 A36. 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-83, e no Apêndice D, os respectivos resultados obtidos pelo aplicativo.

O significado dos símbolos da Tabela 3 é o seguinte:  $t_q$  = tempo de queima;  $E_{med}$  = empuxo médio;  $I_t$  = impulso total; classe = classificação do motor; e  $I_s$  = impulso específico médio. O valor de  $t_q$  foi obtido diretamente de cada curva empuxo *versus* tempo processada. Os demais parâmetros foram obtidos por meio das seguintes equações:

$$I_t = \int_0^{t_q} E dt \quad (2)$$

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

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

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).

**Tabela 3. Resultados principais das curvas de empuxo.**

Motor	tq (s)	Emed (N)	It (Ns)	Classe	Is (s)
BT-80	0,483	3,06	1,48	A3	63,7
BT-81	0,393	3,81	1,50	A4	68,5
BT-82	0,416	4,11	1,71	A4	69,9
BT-83	0,364	4,34	1,58	A4	70,2
BT-84	0,416	3,75	1,56	A4	67,6
BT-85	0,426	3,98	1,70	A4	69,2
BT-86	0,399	3,20	1,28	A3	54,8
BT-87	0,414	3,87	1,60	A4	68,3
BT-88	0,390	4,23	1,65	A4	71,7
BT-120	0,406	4,22	1,72	A4	62,7
BT-124	0,443	3,81	1,69	A4	63,2
BT-128	0,549	3,43	1,88	A3	62,0
BT-90	0,823	3,40	2,80	B3	67,0
BT-91	0,985	3,42	3,37	B3	71,4
BT-92	1,090	3,40	3,71	B3	74,3
BT-93	0,968	3,33	3,22	B3	70,5
BT-94	0,972	3,51	3,42	B4	73,2
BT-96	1,050	3,25	3,41	B3	70,5
BT-97	1,077	3,48	3,74	B3	72,1
BT-98	0,886	3,42	3,03	B3	71,0
BT-99	1,088	3,26	3,55	B3	71,4
BT-121	1,013	3,63	3,67	B4	71,8
BT-125	0,985	3,58	3,53	B4	71,1
BT-129	0,992	3,76	3,73	B4	72,9
BT-100	2,148	3,13	6,73	C3	71,7
BT-101	2,192	3,04	6,67	C3	71,9
BT-102	2,288	3,00	6,87	C3	69,1
BT-103	2,048	2,97	6,09	C3	68,3
BT-105	2,075	3,29	6,82	C3	73,9
BT-106	2,227	3,19	7,11	C3	72,3
BT-107	2,159	3,06	6,61	C3	70,4
BT-108	2,081	3,06	6,37	C3	69,0
BT-109	2,053	3,23	6,62	C3	73,5
BT-122	2,108	3,49	7,35	C3	75,3
BT-126	2,278	3,17	7,22	C3	70,3
BT-130	1,897	3,51	6,65	C4	73,7

Pode-se ver na Tabela 3 que os 36 motores testados se enquadram em 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 após a letra na classe representa o valor do empuxo médio arredondado para um número inteiro.

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

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

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

**Tabela 4. Resultados secundários das curvas de empuxo.**

Motor	E <sub>max</sub> (N)	E (%)		f <sub>m</sub> (g/s)	c (m/s)
		$\frac{E_{max}}{E_{med}}$	$\frac{E_{min}}{E_{max}}$		
BT-80	6,50	2,12	3,85	4,91	624
BT-81	6,89	1,81	3,63	5,68	671
BT-82	7,16	1,74	3,49	6,00	684
BT-83	8,22	1,89	3,04	6,31	687
BT-84	6,42	1,71	3,90	5,67	662
BT-85	6,90	1,73	3,62	5,87	677
BT-86	5,59	1,75	4,47	5,97	537
BT-87	7,88	2,04	3,17	5,78	669
BT-88	6,75	1,59	3,71	6,03	702
BT-120	7,37	1,75	3,39	6,88	614
BT-124	6,76	1,77	3,70	6,16	619
BT-128	7,44	2,17	3,36	5,64	607
BT-90	6,29	1,85	3,97	5,19	656
BT-91	6,39	1,87	3,91	4,89	699
BT-92	6,99	2,06	3,58	4,67	728
BT-93	7,08	2,13	3,53	4,82	690
BT-94	6,54	1,86	3,82	4,90	717
BT-96	6,11	1,88	4,09	4,71	690
BT-97	6,00	1,73	4,16	4,93	705
BT-98	7,67	2,24	3,26	4,92	695
BT-99	4,97	1,53	5,03	4,66	699
BT-121	8,15	2,25	3,07	5,16	702
BT-125	7,51	2,10	3,33	5,14	696
BT-129	8,32	2,21	3,00	5,27	714
BT-100	6,87	2,19	3,64	4,47	701
BT-101	6,43	2,11	3,89	4,33	704
BT-102	7,29	2,43	3,43	4,44	676
BT-103	6,06	2,04	4,13	4,45	668
BT-105	7,12	2,17	3,51	4,54	723
BT-106	7,70	2,41	3,25	4,51	707
BT-107	6,19	2,02	4,04	4,44	689
BT-108	8,01	2,62	3,12	4,53	675
BT-109	8,03	2,49	3,11	4,48	719
BT-122	8,66	2,48	2,89	4,73	737
BT-126	7,95	2,51	3,15	4,60	688
BT-130	7,72	2,20	3,24	4,86	721

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

<b>Motores</b>	<b>A6-0</b>	<b>B6-0</b>	<b>C6-0</b>
Classe	A4	B3	C3
It (Ns)	1,61	3,43	6,76
U de It (Ns)	0,33	0,65	0,77
U de It (%)	21	19	11
Emed (N)	3,82	3,45	3,18
U de Emed (N)	0,90	0,33	0,39
U de Emed (%)	24	9,6	12
tq (s)	0,42	0,99	2,13
U de tq (s)	0,11	0,18	0,24
U de tq (%)	25	18	11
Is (s)	66	71,4	71,6
U de Is (s)	11	4,0	4,9
U de Is (%)	16	5,6	6,8
E <sub>max</sub> (N)	7,0	6,8	7,3
U de E <sub>max</sub> (N)	1,5	2,1	1,8
U de E <sub>max</sub> (%)	22	31	25
f <sub>m</sub> (g/s)	5,9	4,94	4,53
U de f <sub>m</sub> (g/s)	1,0	0,46	0,31
U de f <sub>m</sub> (%)	17	9,3	6,9
c (m/s)	650	699	701
U de c (m/s)	100	39	48
U de c (%)	16	5,6	6,9

A Tabela 6 apresenta resultados de cada motor C6-5 bem como suas médias e incertezas expandidas (U). Cada valor médio foi obtido pela média aritmética de todos os motores. 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).

O significado dos termos da Tabela 6 é: tq<sub>p</sub> = tempo de queima da carga propulsora; tq<sub>t</sub> = tempo de queima da carga temporizadora; te<sub>j</sub> = tempo de ejeção, que é o tempo entre o início da queima da carga propulsora e o início da queima da carga ejetora, dado por

$$te_j = tq_p + tq_t \quad (7)$$

### ***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.

**Tabela 6. Resultados dos motores C6-5.**

<b>Motor</b>	<b>tqp (s)</b>	<b>tqt (s)</b>	<b>tej (s)</b>
BT-110	2,067	3,600	5,667
BT-111	1,933	4,367	6,300
BT-112	2,100	4,033	6,133
BT-113	1,933	3,233	5,166
BT-114	2,033	3,667	5,700
BT-115	2,033	3,600	5,633
BT-116	1,867	5,967	7,834
BT-117	1,933	3,467	5,400
BT-118	1,967	4,133	6,100
BT-119	1,933	4,100	6,033
BT-123	2,033	4,033	6,066
BT-127	1,967	3,800	5,767
BT-131	1,867	3,100	4,967
Média (s)	1,97	3,9	5,9
U (s)	0,16	1,6	1,5
U (%)	8,1	40	26

## **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.

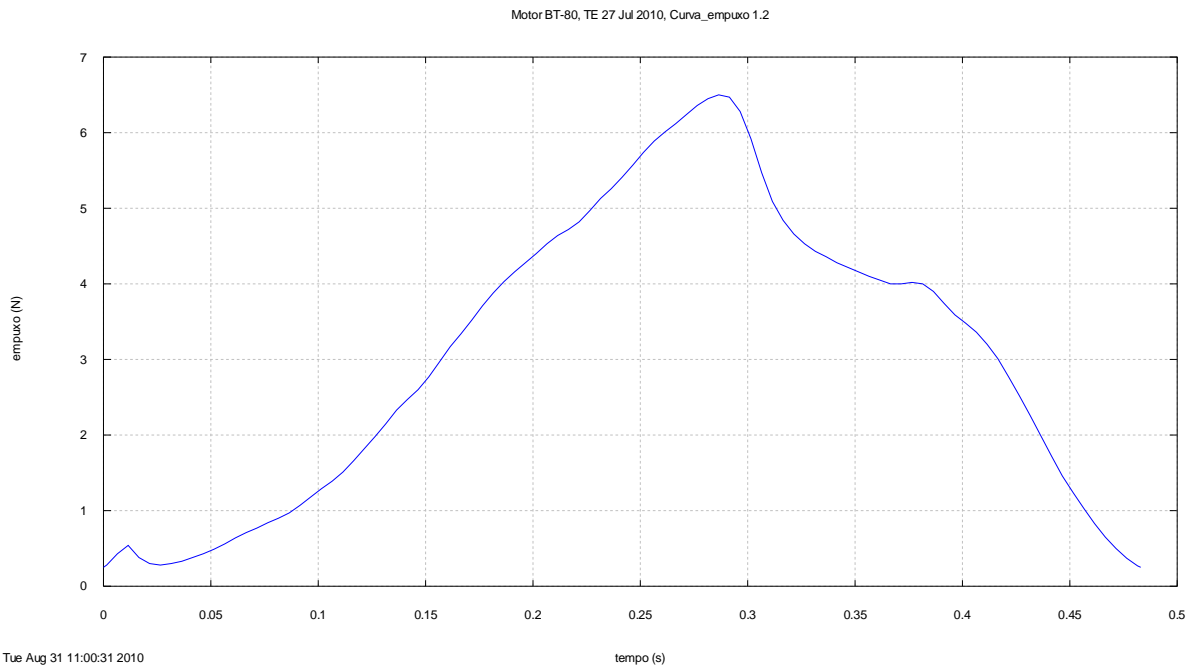
KREYSZIG, E. **Advanced engineering mathematics**. 8 ed. New York: Wiley, 1999.

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

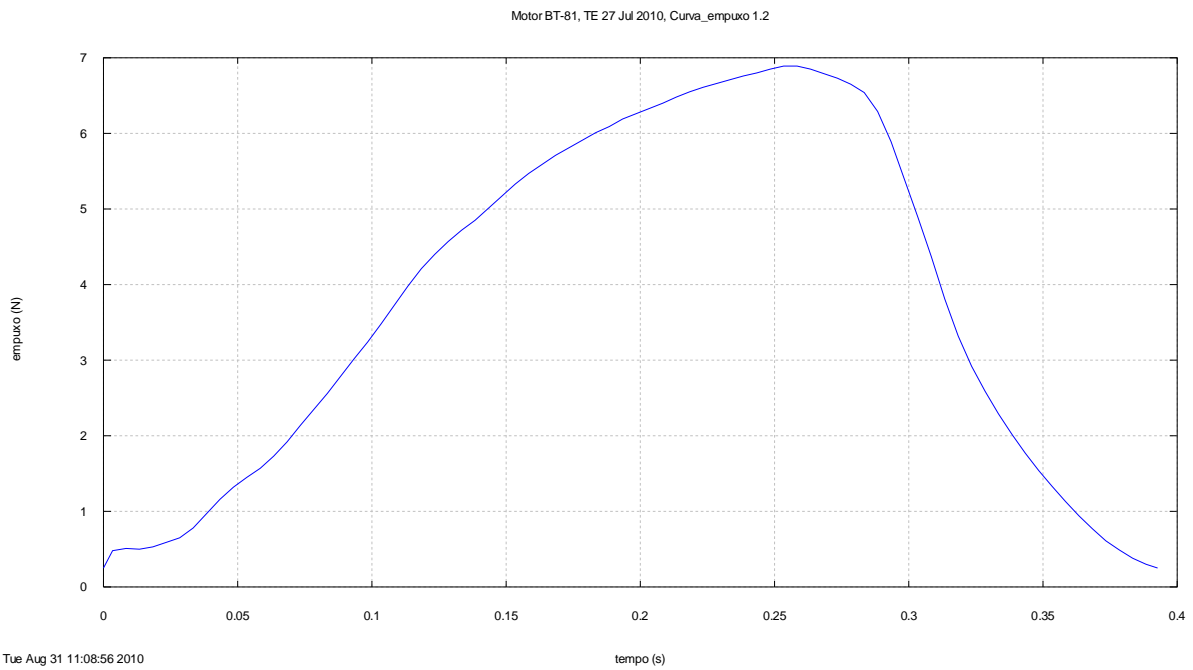
[www.nar.org](http://www.nar.org) (2010).

[www.thrustcurve.org](http://www.thrustcurve.org) (2010).

## **APÊNDICE A – curvas de empuxo x tempo**

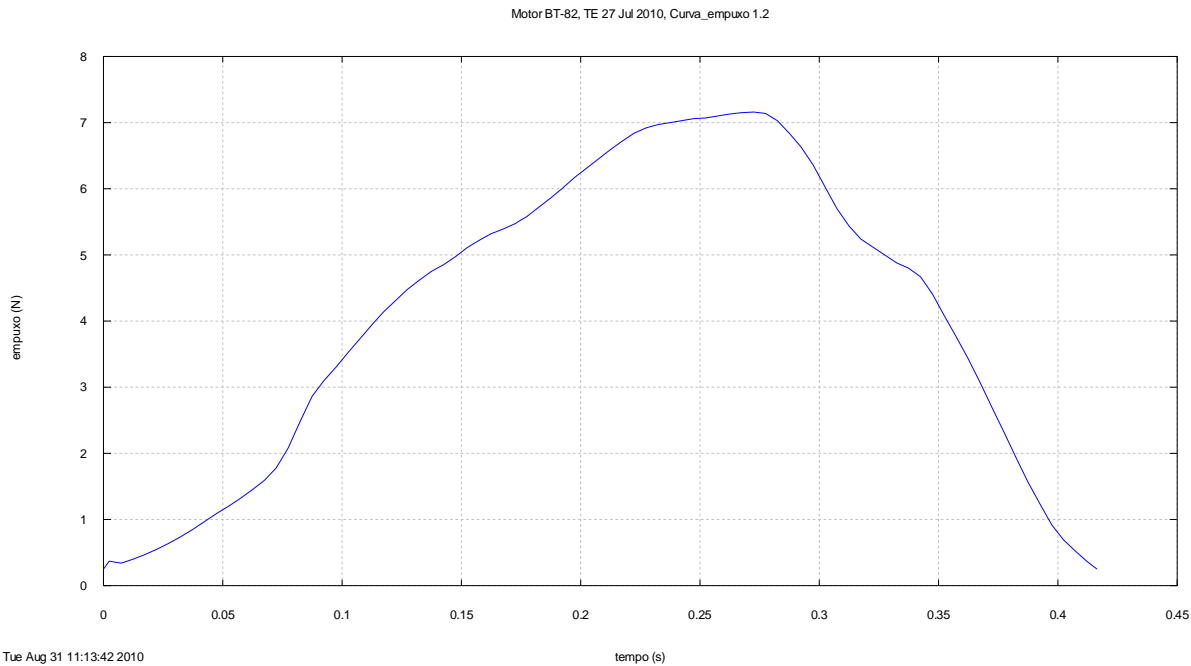


**Figura A1. Curva empuxo *versus* tempo processada do motor-foguete BT-80.**

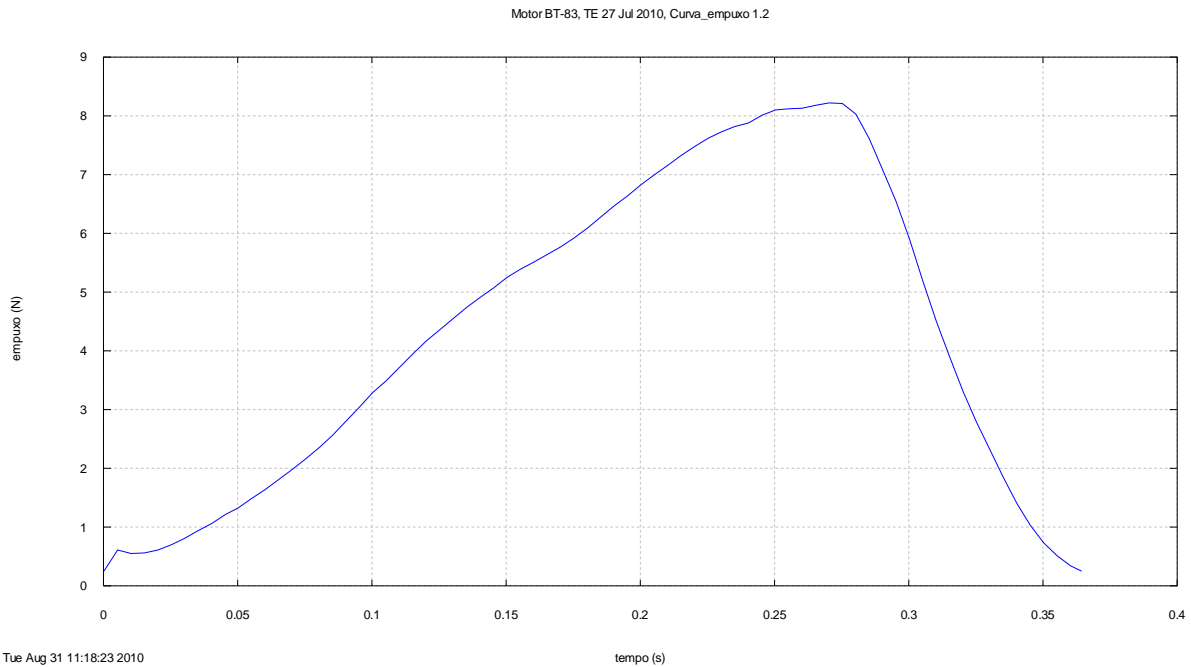


**Figura A2. Curva empuxo *versus* tempo processada do motor-foguete BT-81.**

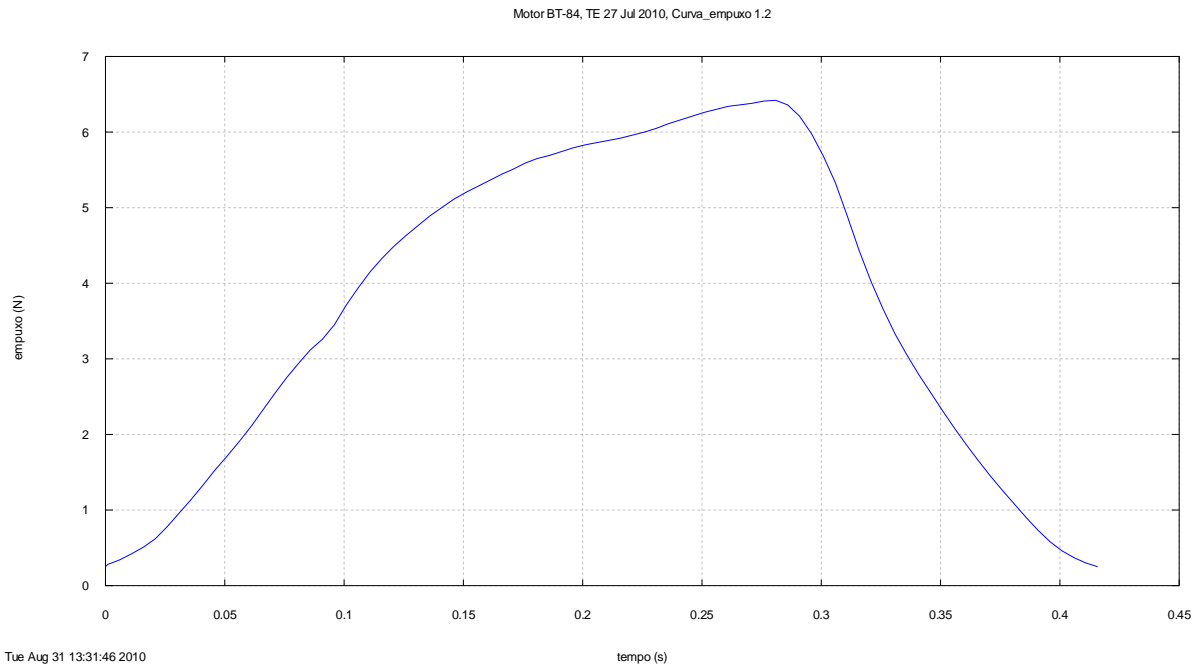




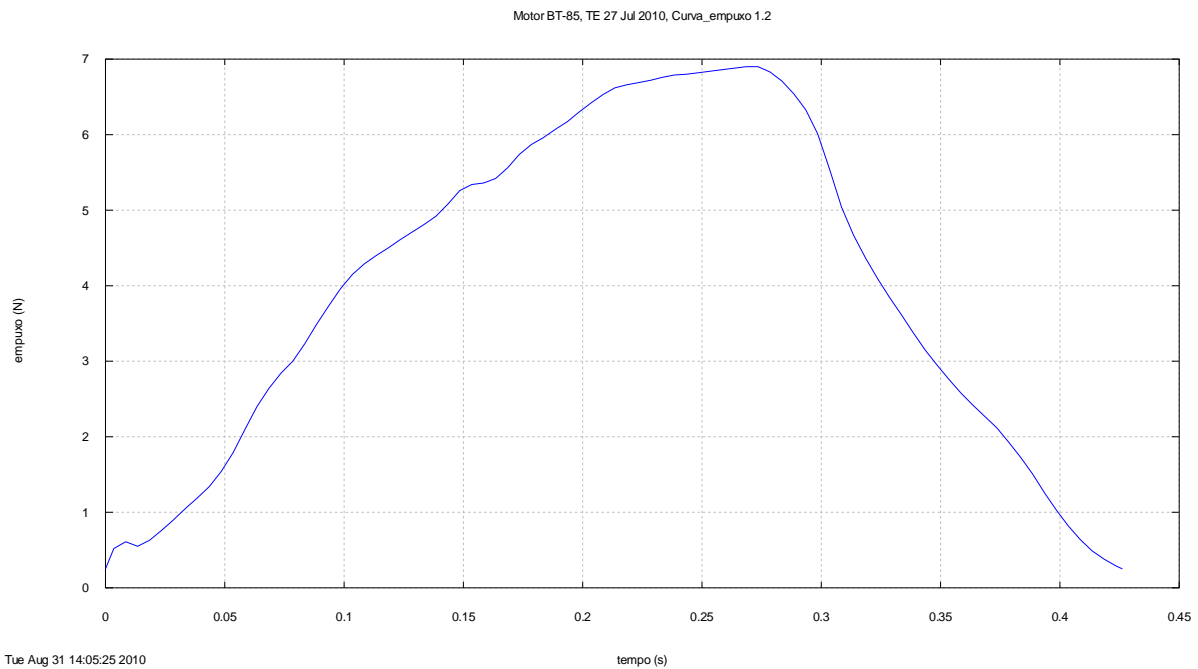
**Figura A3. Curva empuxo *versus* tempo processada do motor-foguete BT-82.**



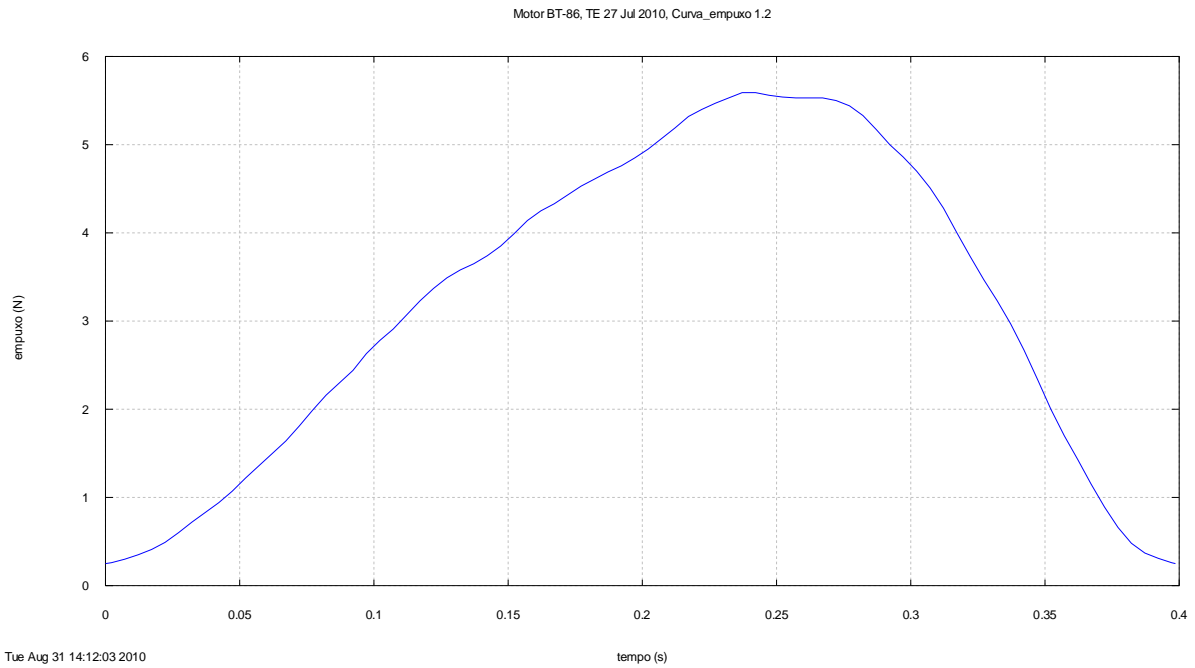
**Figura A4. Curva empuxo *versus* tempo processada do motor-foguete BT-83.**



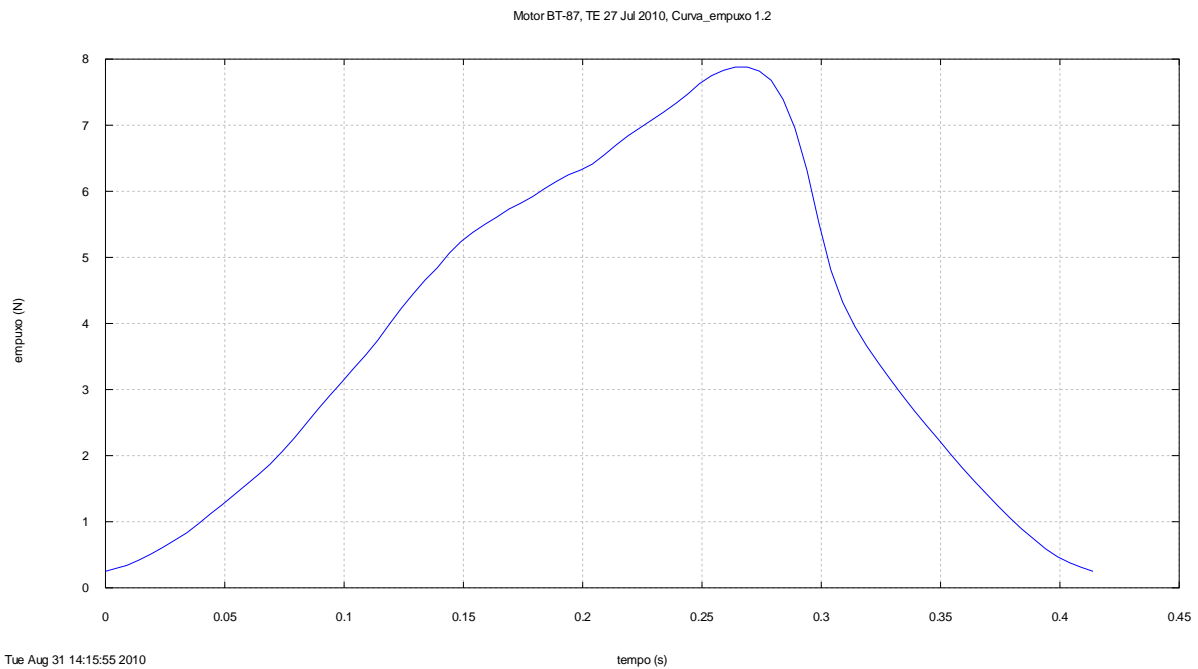
**Figura A5. Curva empuxo *versus* tempo processada do motor-foguete BT-84.**



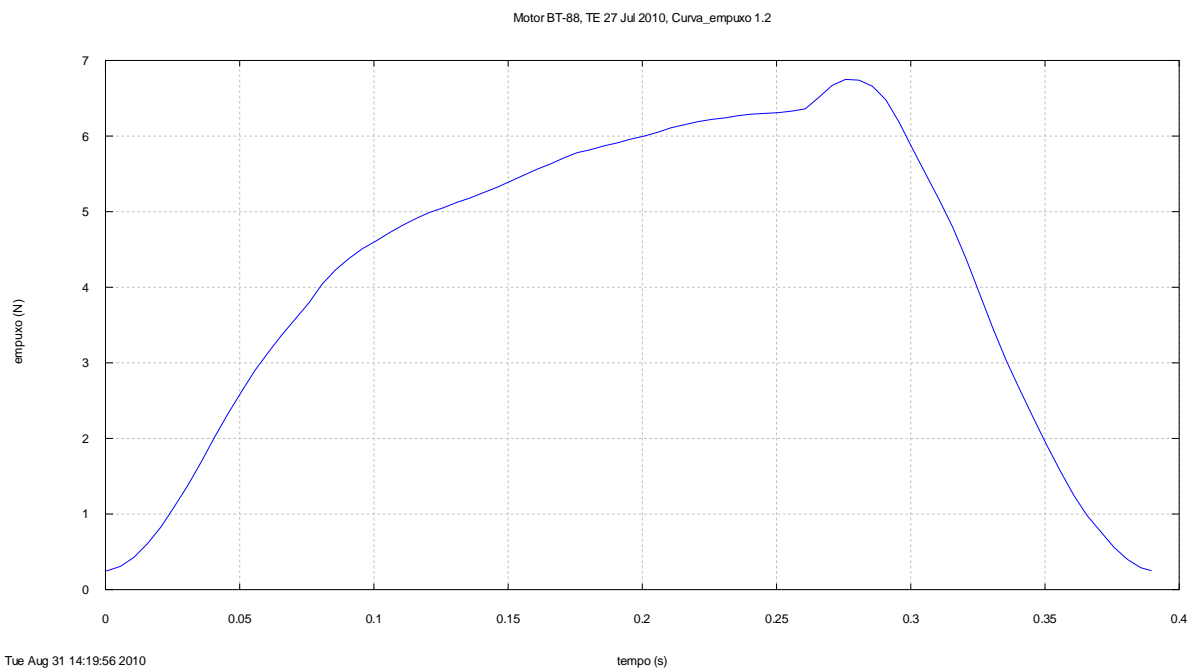
**Figura A6. Curva empuxo *versus* tempo processada do motor-foguete BT-85.**



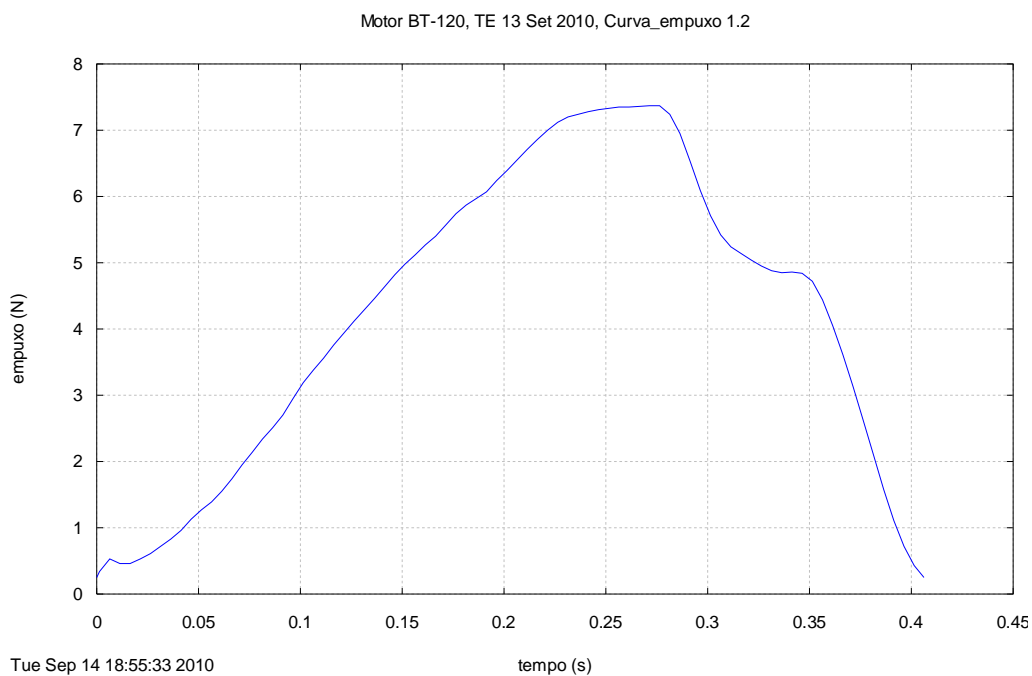
**Figura A7. Curva empuxo *versus* tempo processada do motor-foguete BT-86.**



**Figura A8. Curva empuxo *versus* tempo processada do motor-foguete BT-87.**

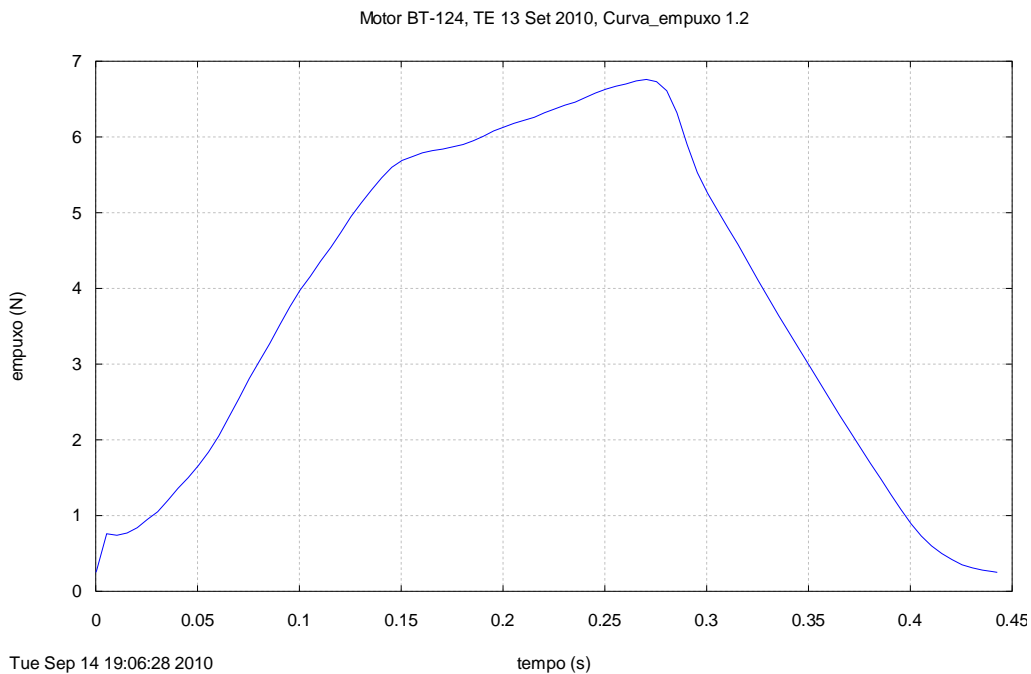


**Figura A9.** Curva empuxo *versus* tempo processada do motor-foguete BT-88.

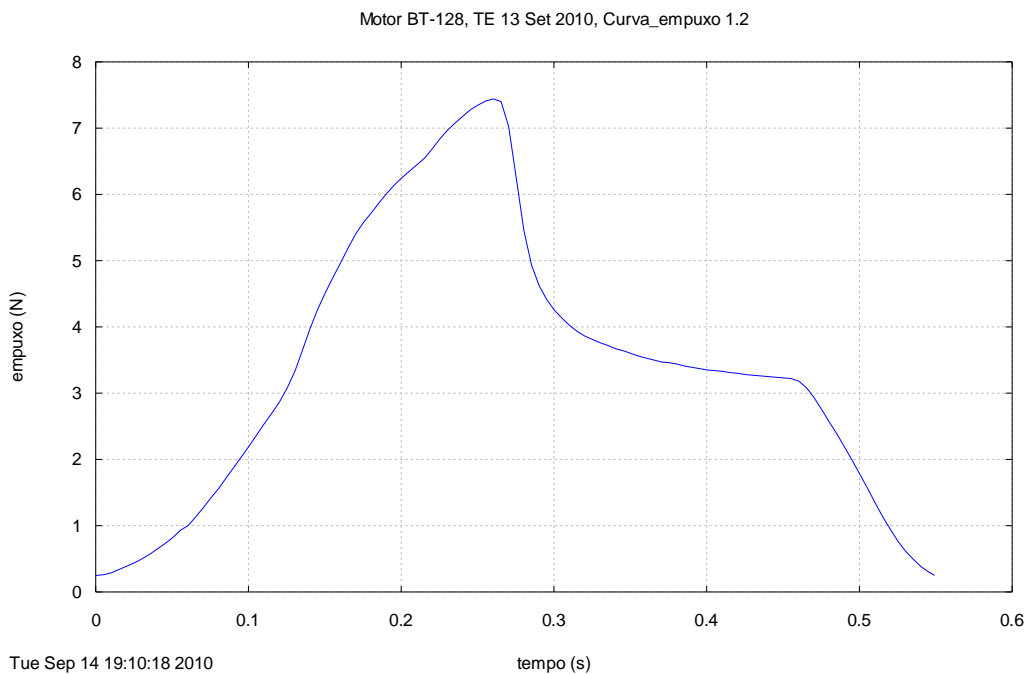


**Figura A10.** Curva empuxo *versus* tempo processada do motor-foguete BT-120.

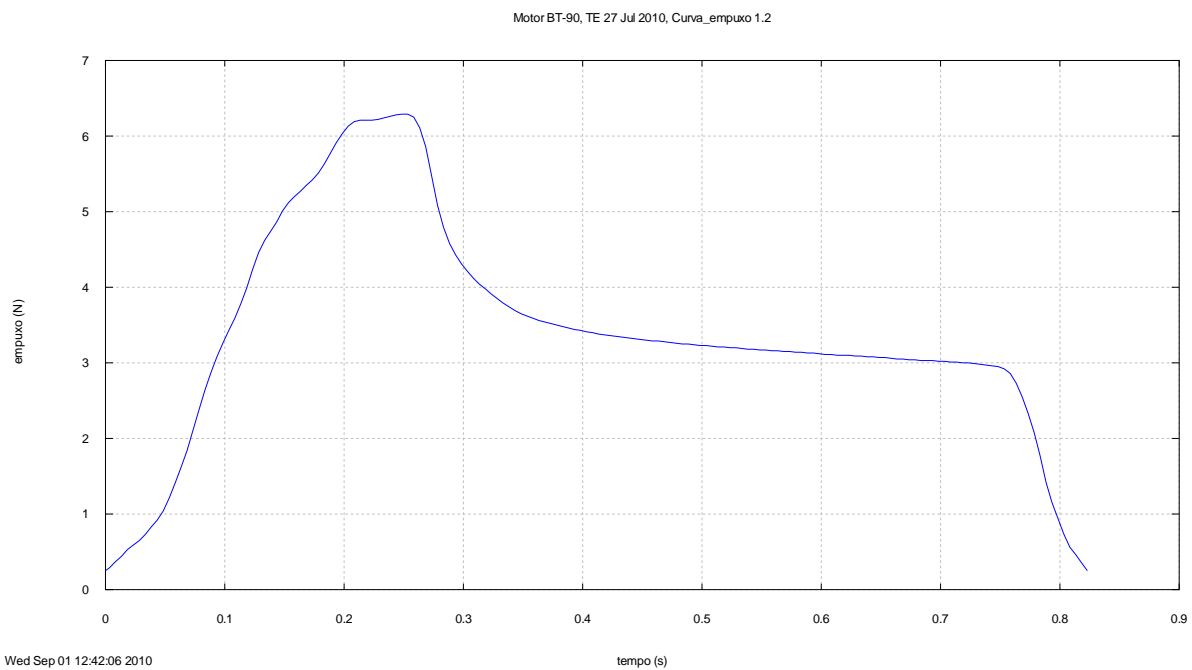




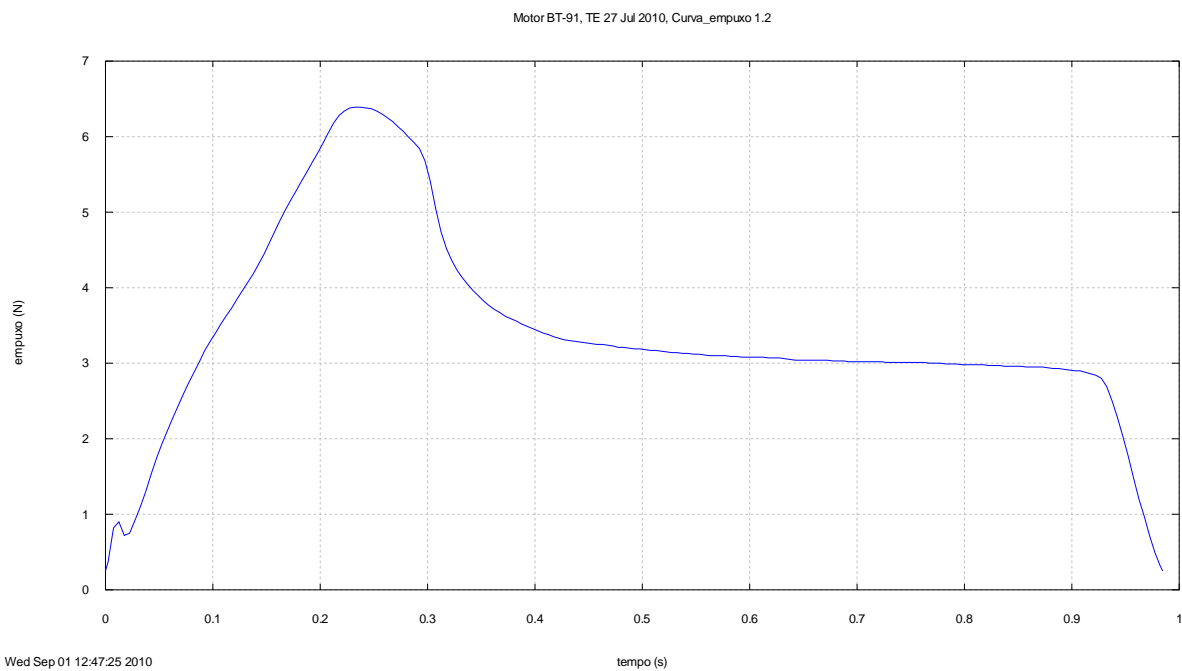
**Figura A11.** Curva empuxo *versus* tempo processada do motor-foguete BT-124.



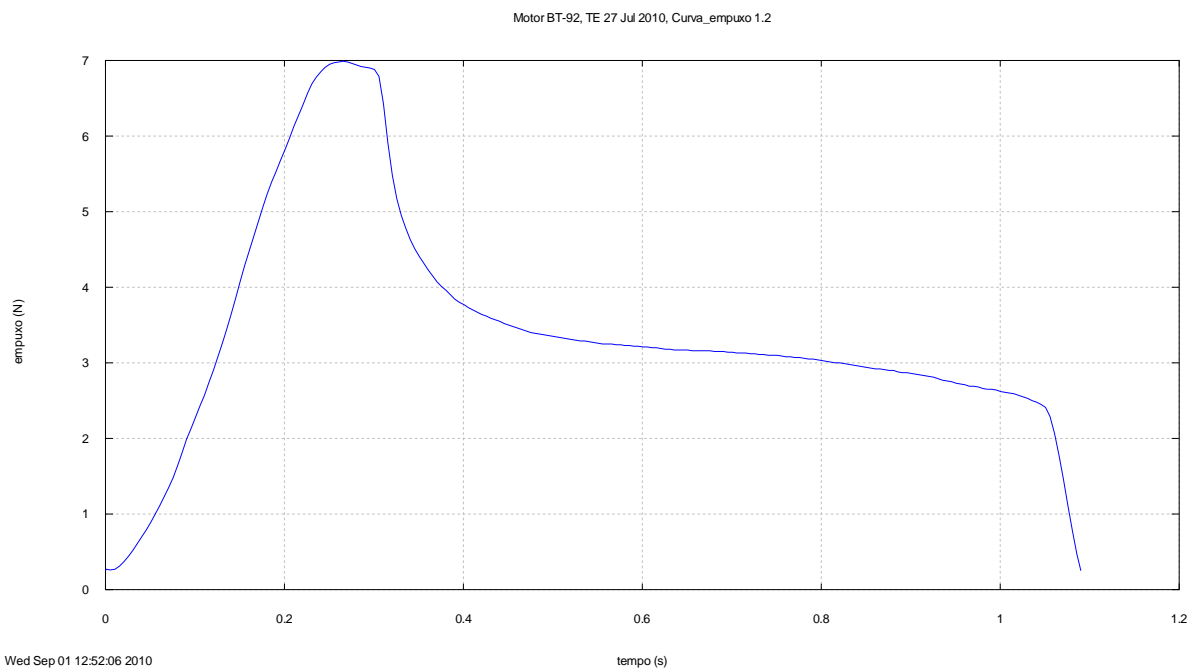
**Figura A12.** Curva empuxo *versus* tempo processada do motor-foguete BT-128.



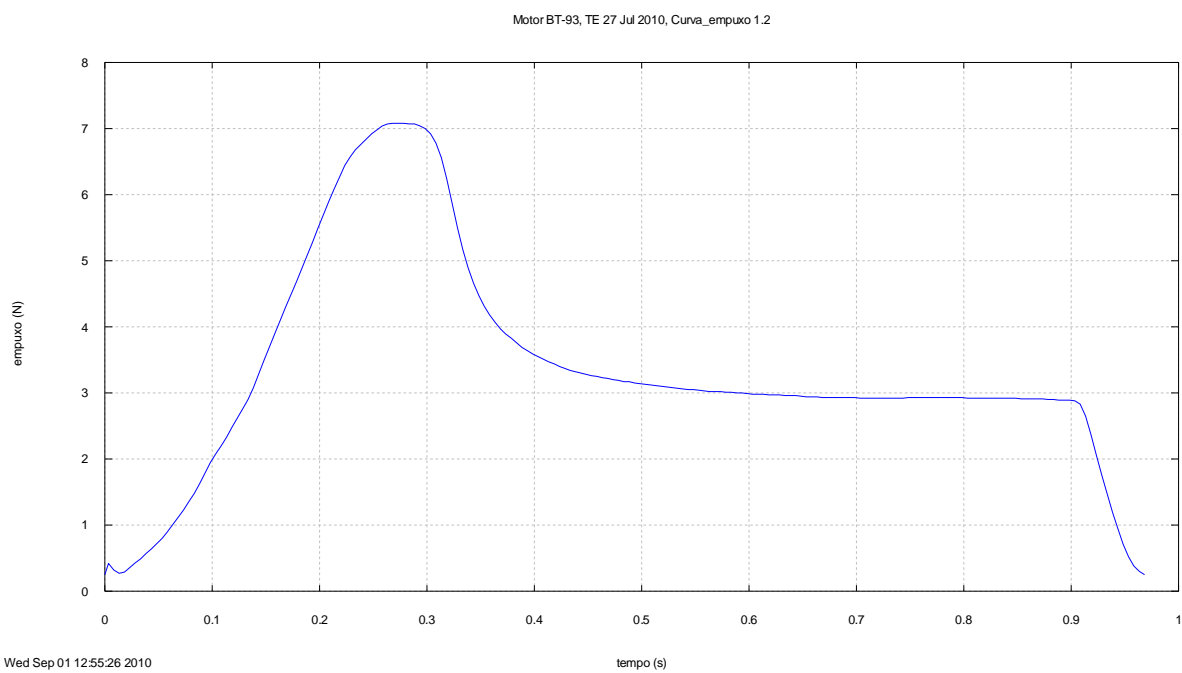
**Figura A13. Curva empuxo versus tempo processada do motor-foguete BT-90.**



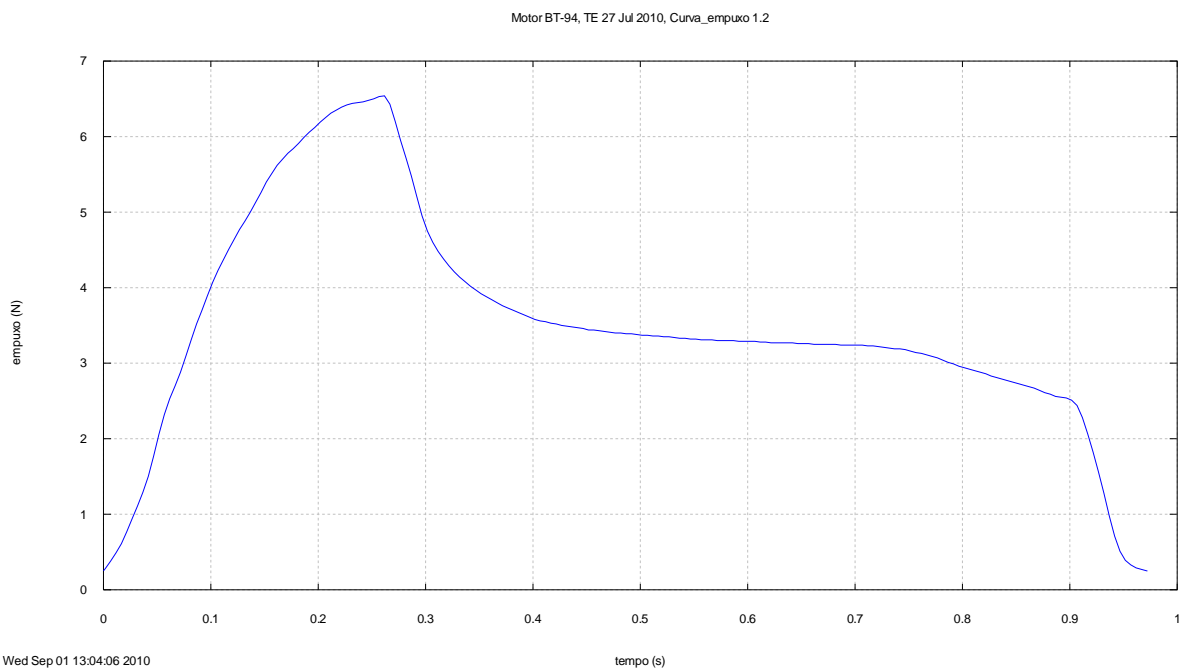
**Figura A14. Curva empuxo versus tempo processada do motor-foguete BT-91.**



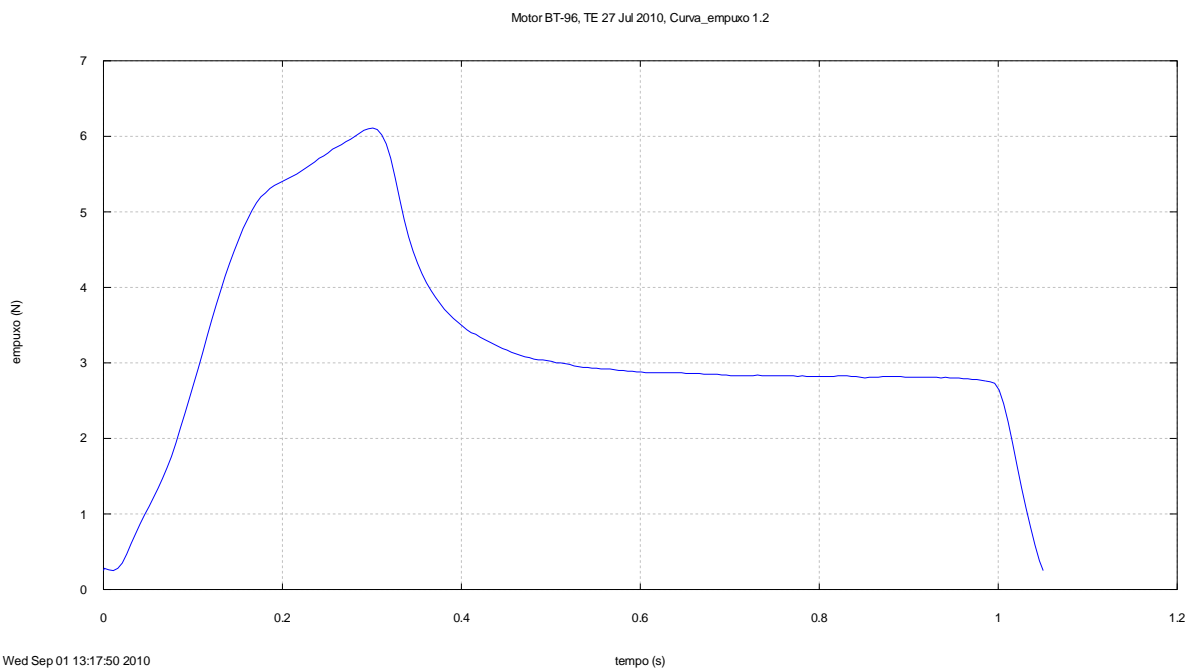
**Figura A15. Curva empuxo *versus* tempo processada do motor-foguete BT-92.**



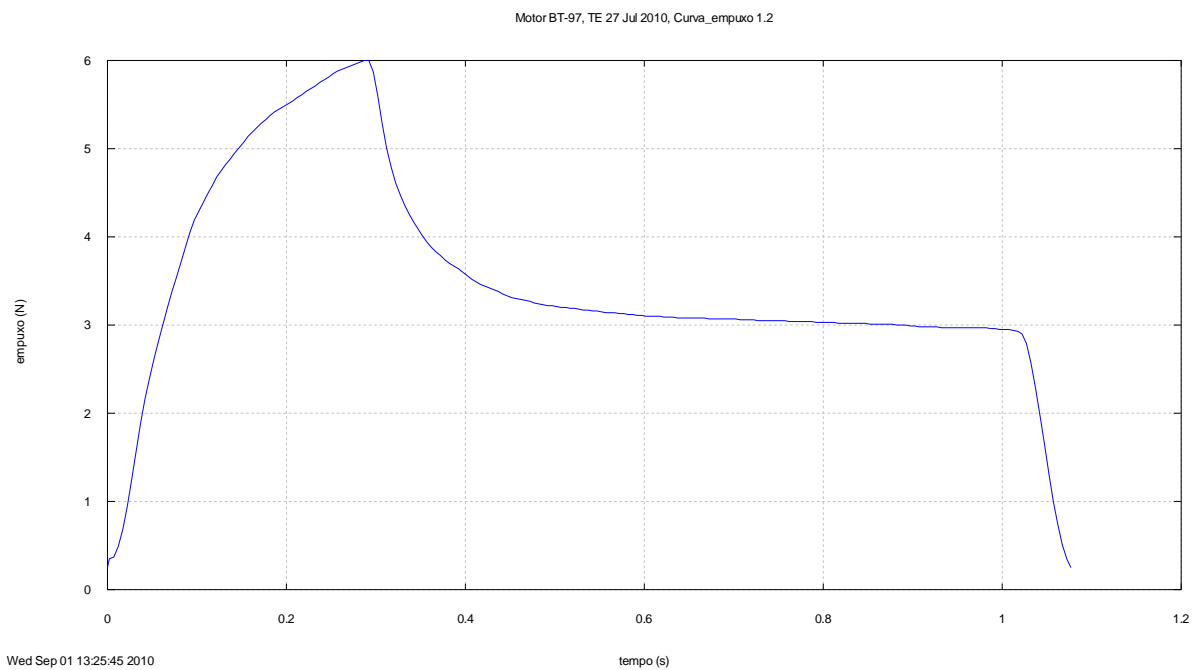
**Figura A16. Curva empuxo *versus* tempo processada do motor-foguete BT-93.**



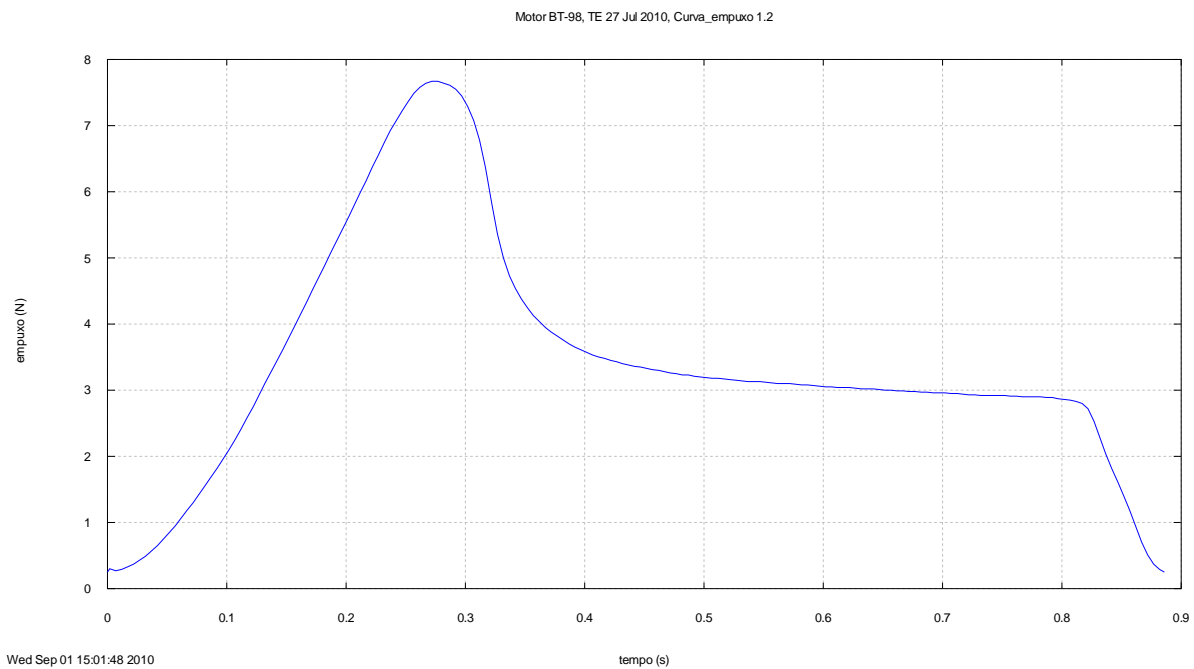
**Figura A17.** Curva empuxo *versus* tempo processada do motor-foguete BT-94.



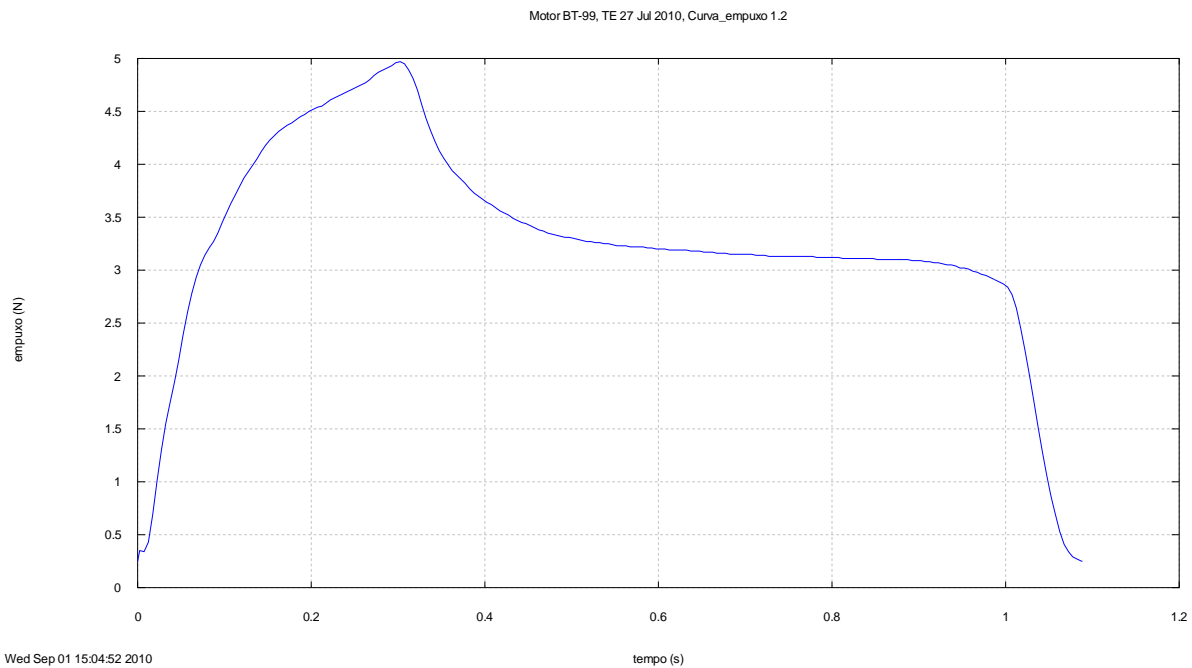
**Figura A18.** Curva empuxo *versus* tempo processada do motor-foguete BT-96.



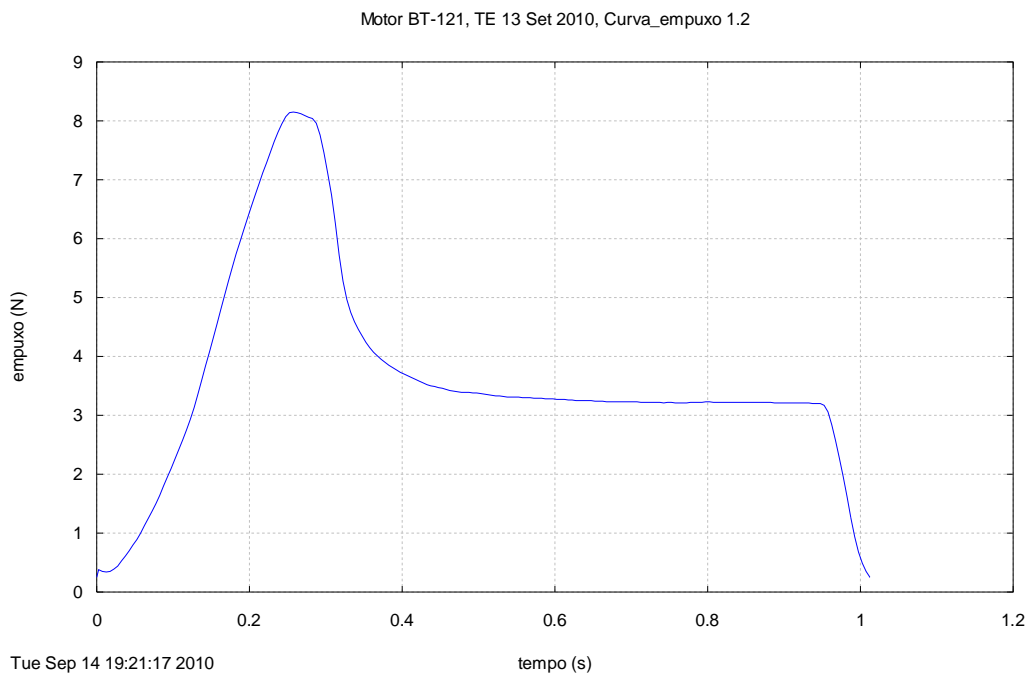
**Figura A19. Curva empuxo versus tempo processada do motor-foguete BT-97.**



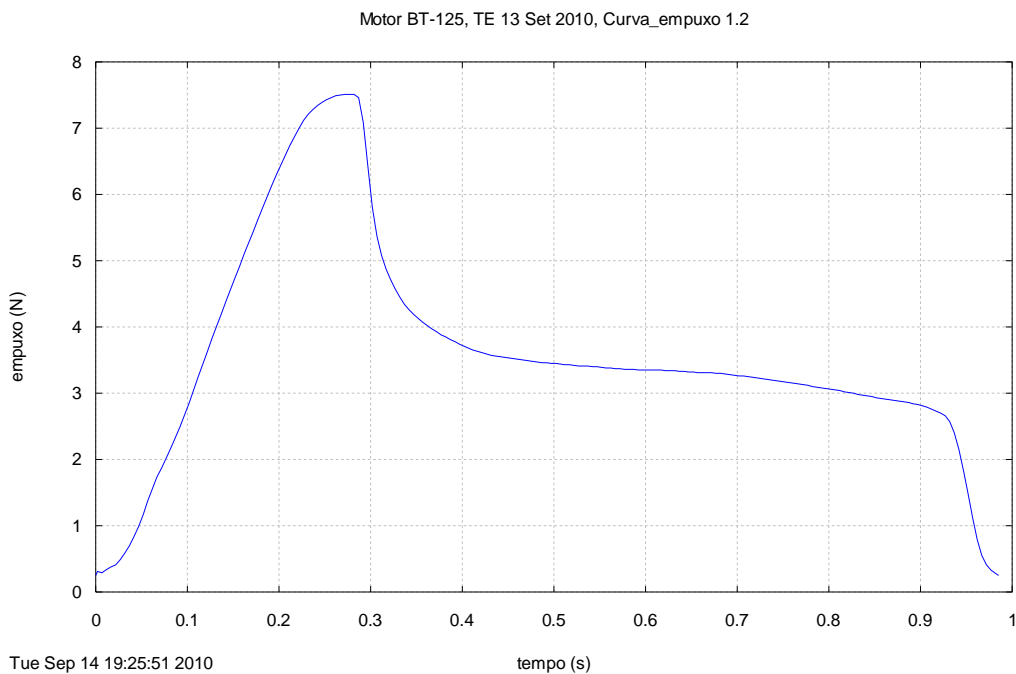
**Figura A20. Curva empuxo versus tempo processada do motor-foguete BT-98.**



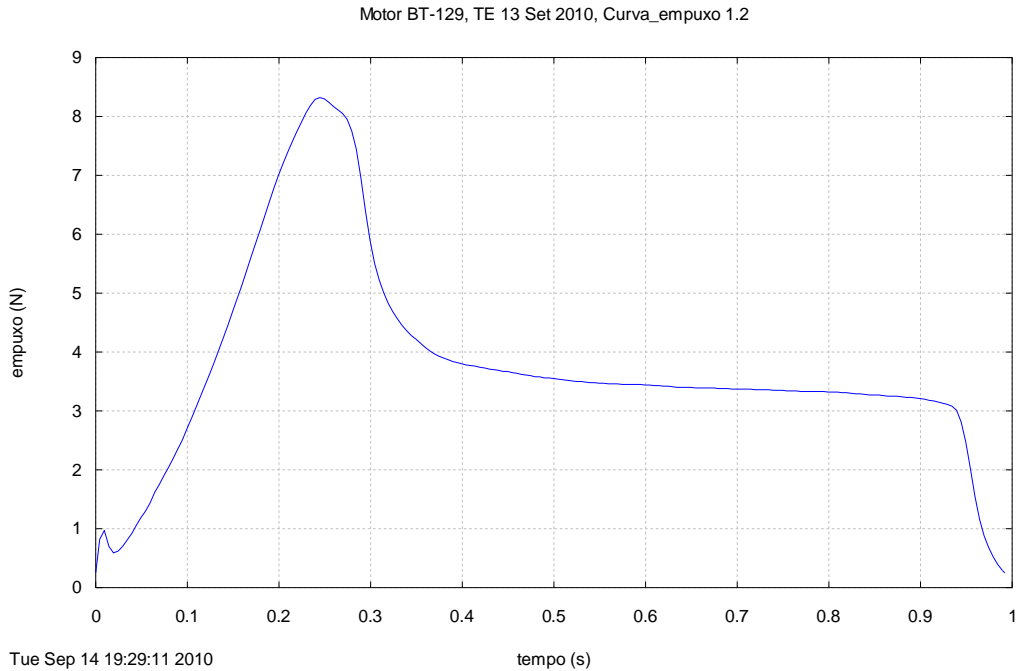
**Figura A21. Curva empuxo *versus* tempo processada do motor-foguete BT-99.**



**Figura A22. Curva empuxo *versus* tempo processada do motor-foguete BT-121.**

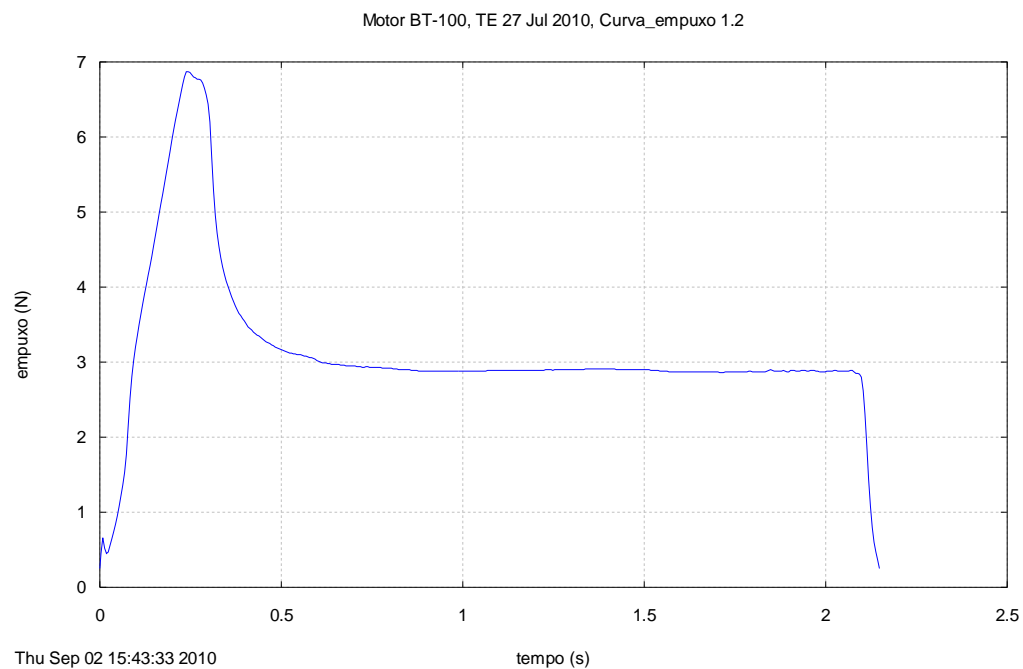


**Figura A23.** Curva empuxo *versus* tempo processada do motor-foguete BT-125.

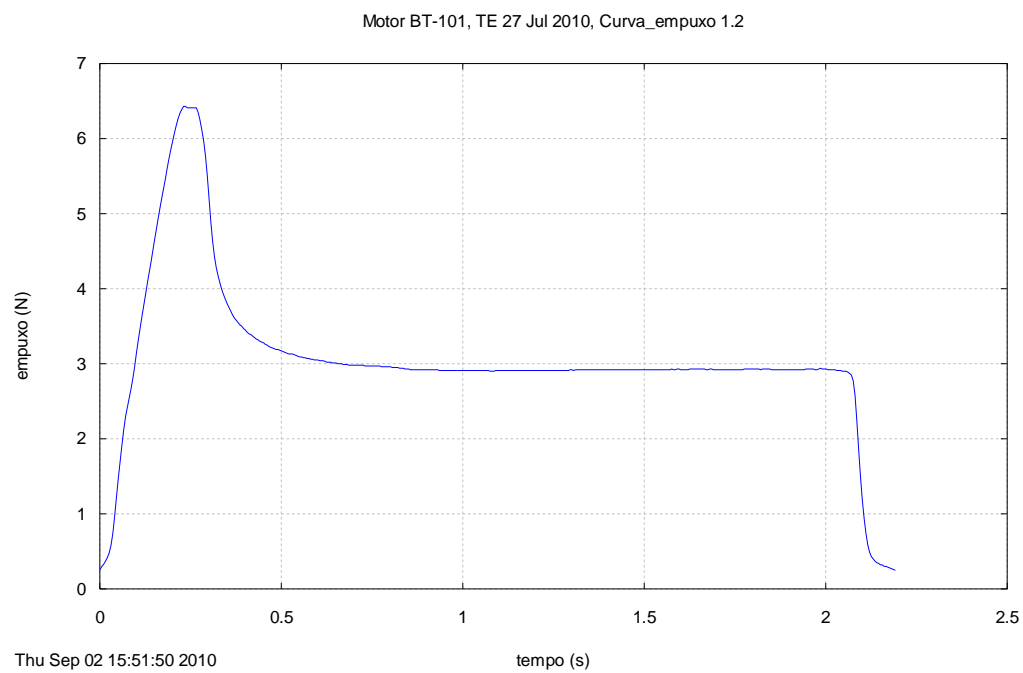


**Figura A24.** Curva empuxo *versus* tempo processada do motor-foguete BT-129.

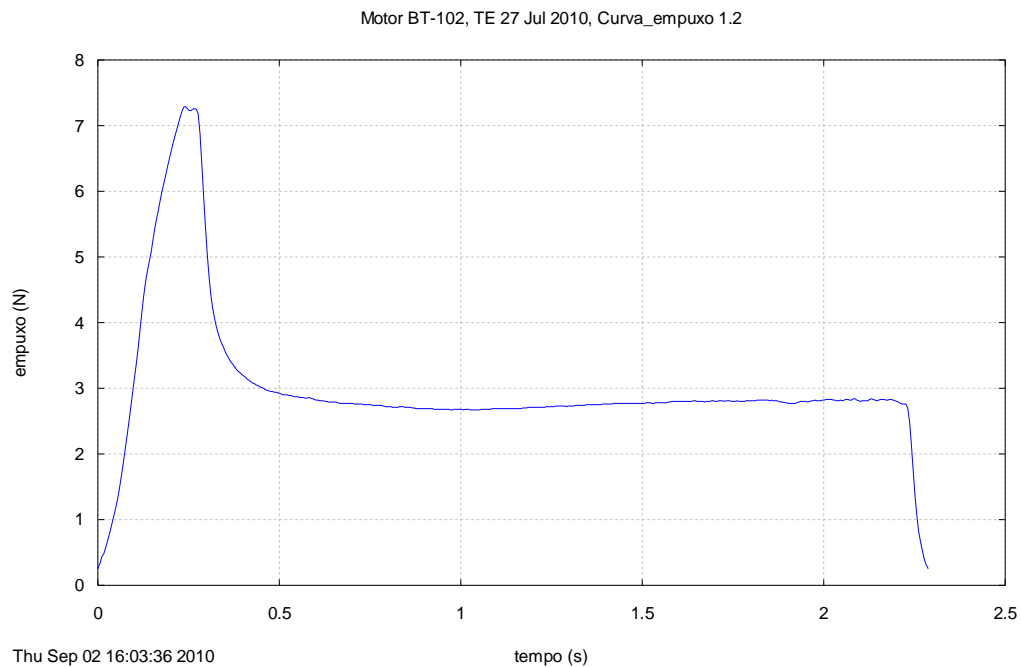




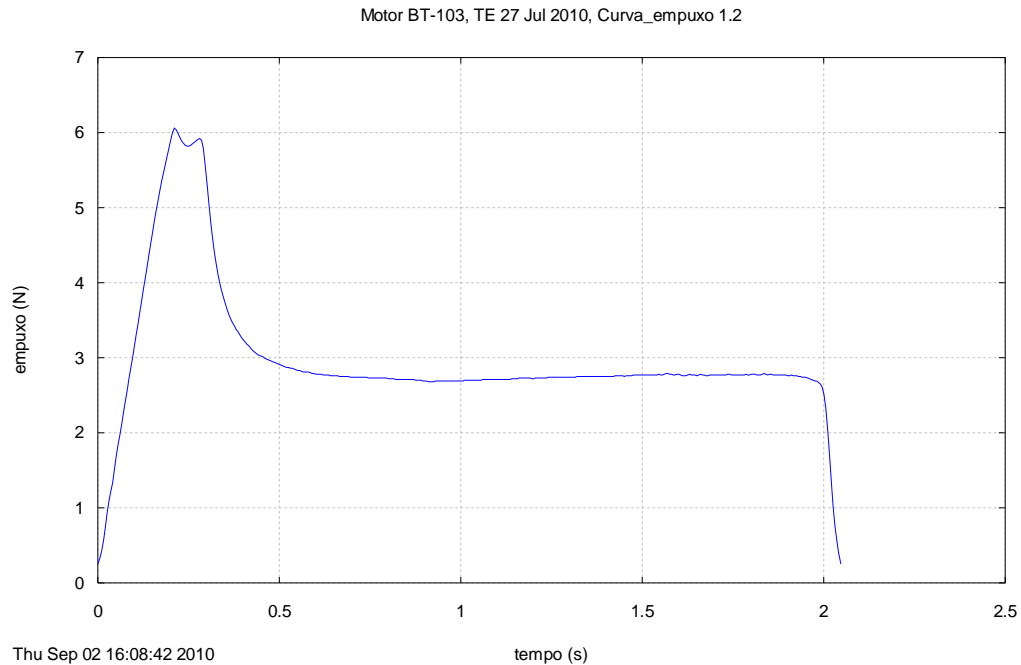
**Figura A25. Curva empuxo *versus* tempo processada do motor-foguete BT-100.**



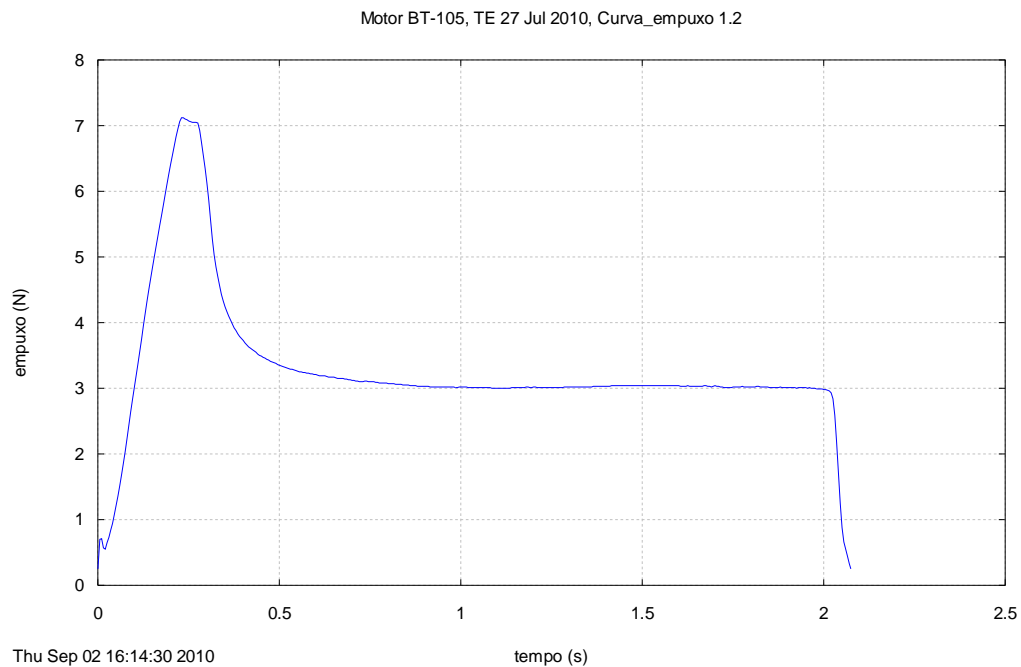
**Figura A26. Curva empuxo *versus* tempo processada do motor-foguete BT-101.**



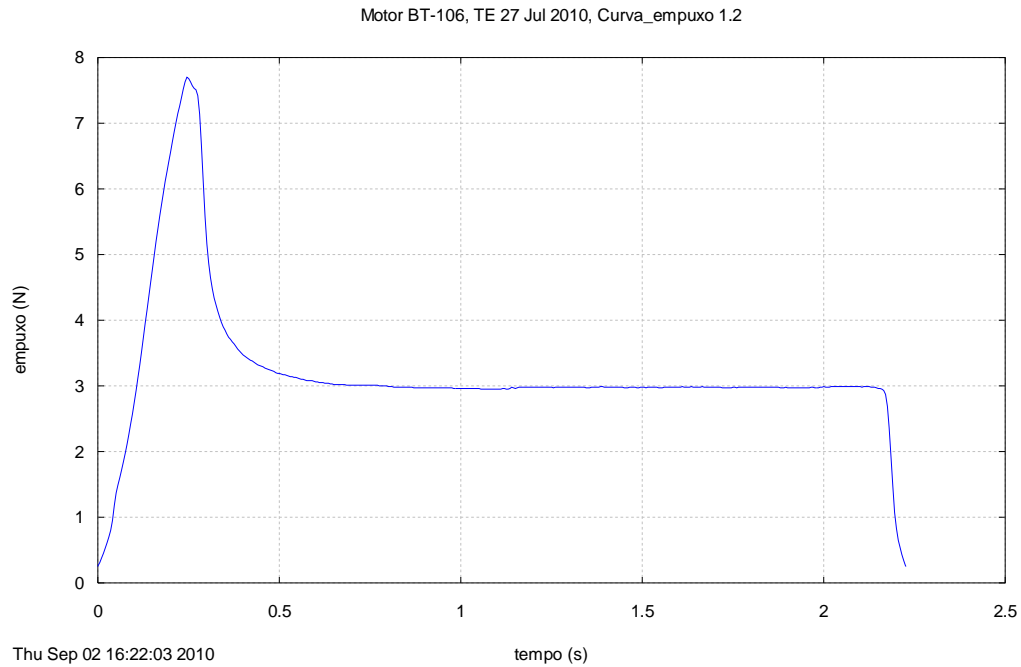
**Figura A27. Curva empuxo *versus* tempo processada do motor-foguete BT-102.**



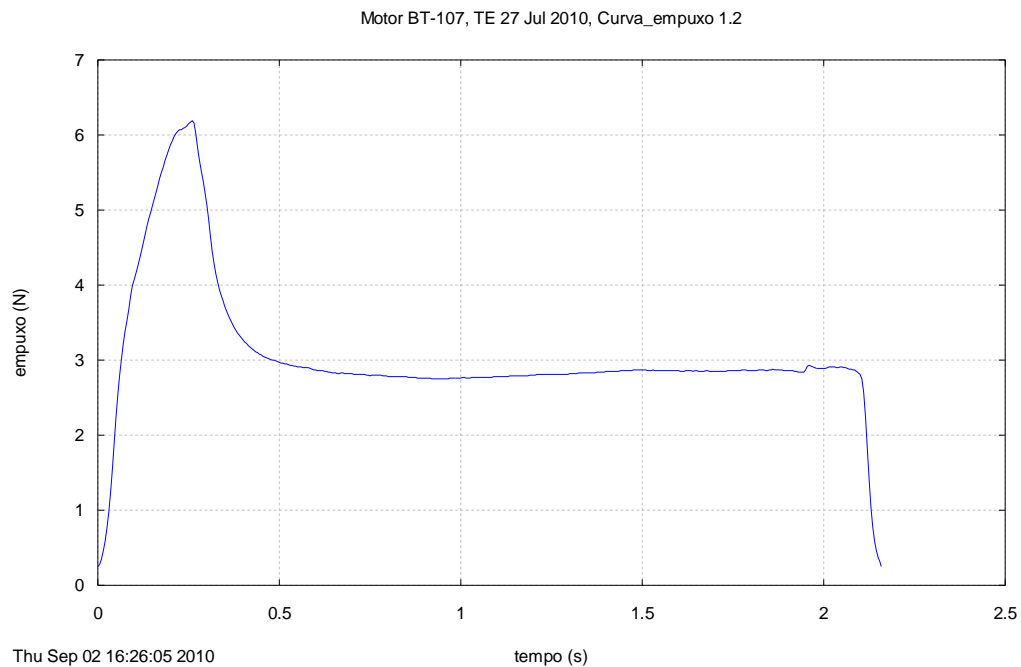
**Figura A28. Curva empuxo *versus* tempo processada do motor-foguete BT-103.**



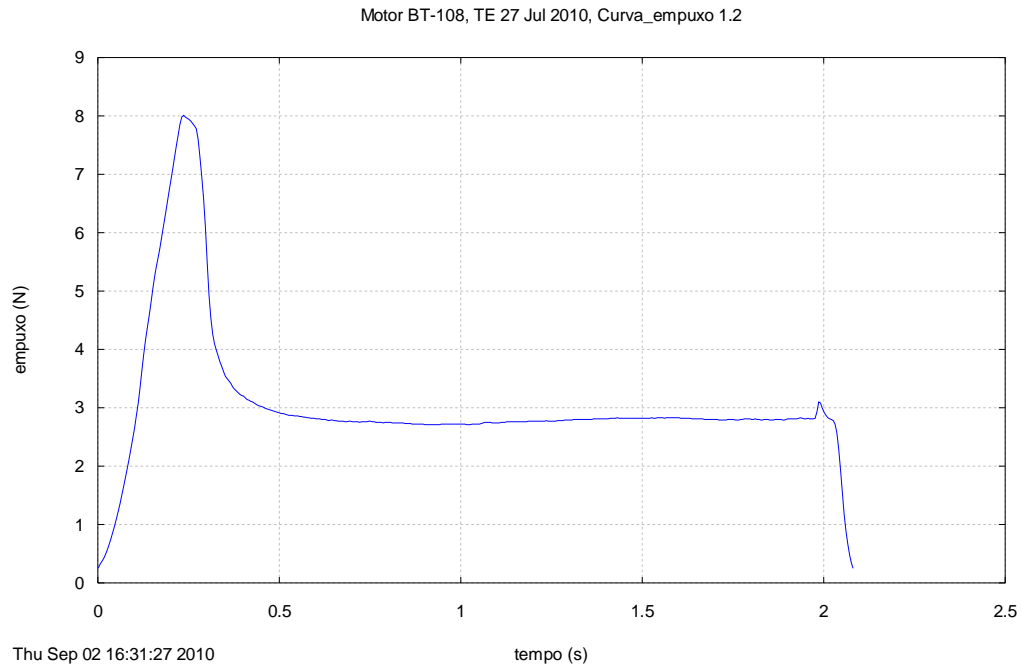
**Figura A29.** Curva empuxo *versus* tempo processada do motor-foguete BT-105.



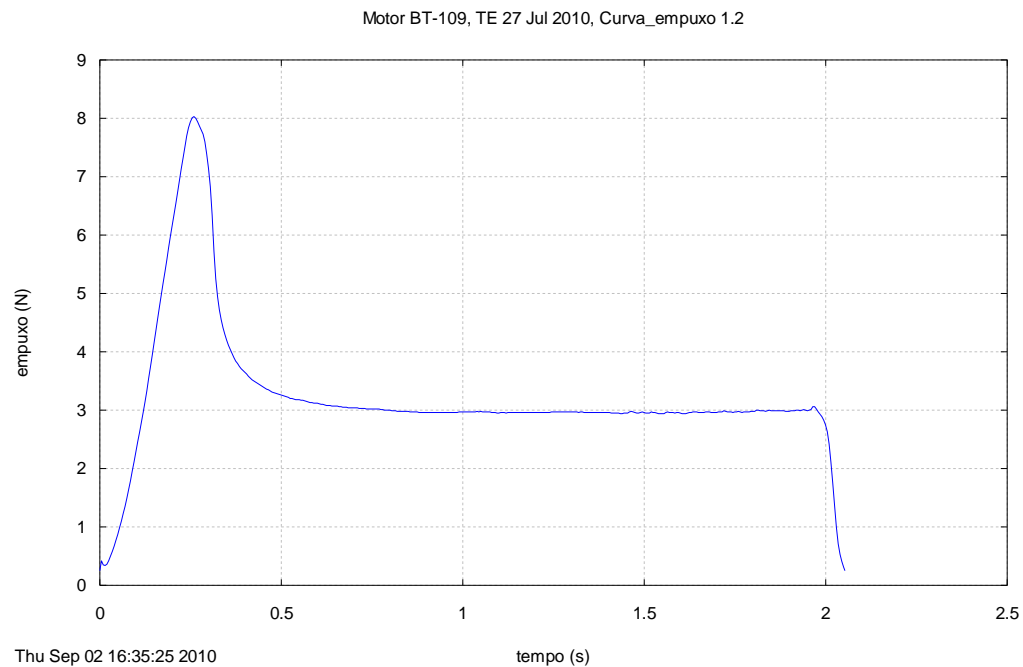
**Figura A30.** Curva empuxo *versus* tempo processada do motor-foguete BT-106.



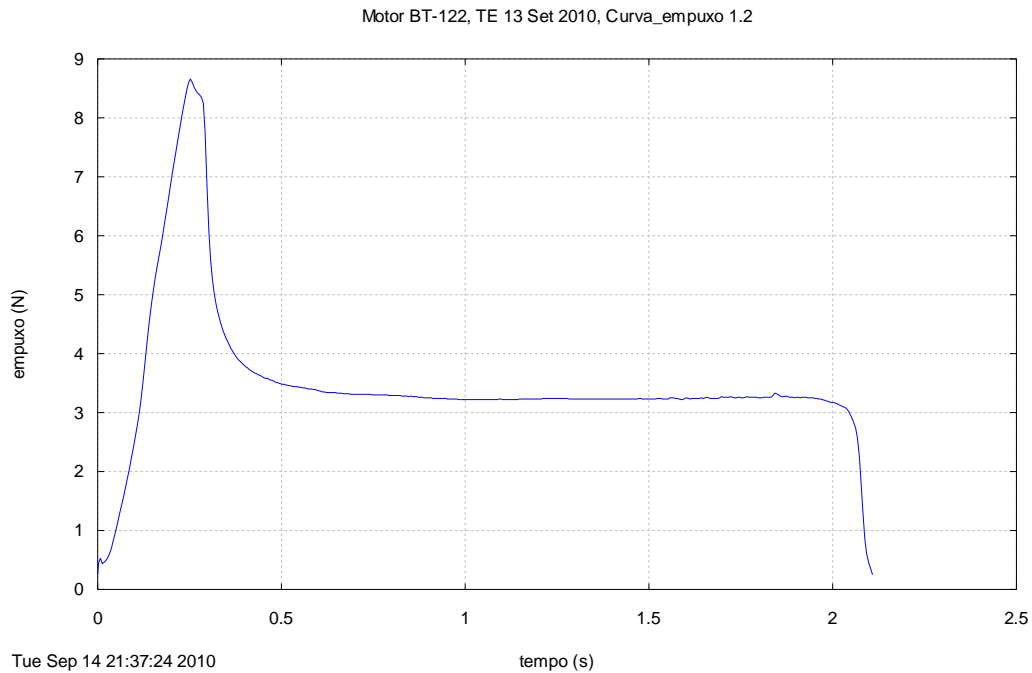
**Figura A31. Curva empuxo *versus* tempo processada do motor-foguete BT-107.**



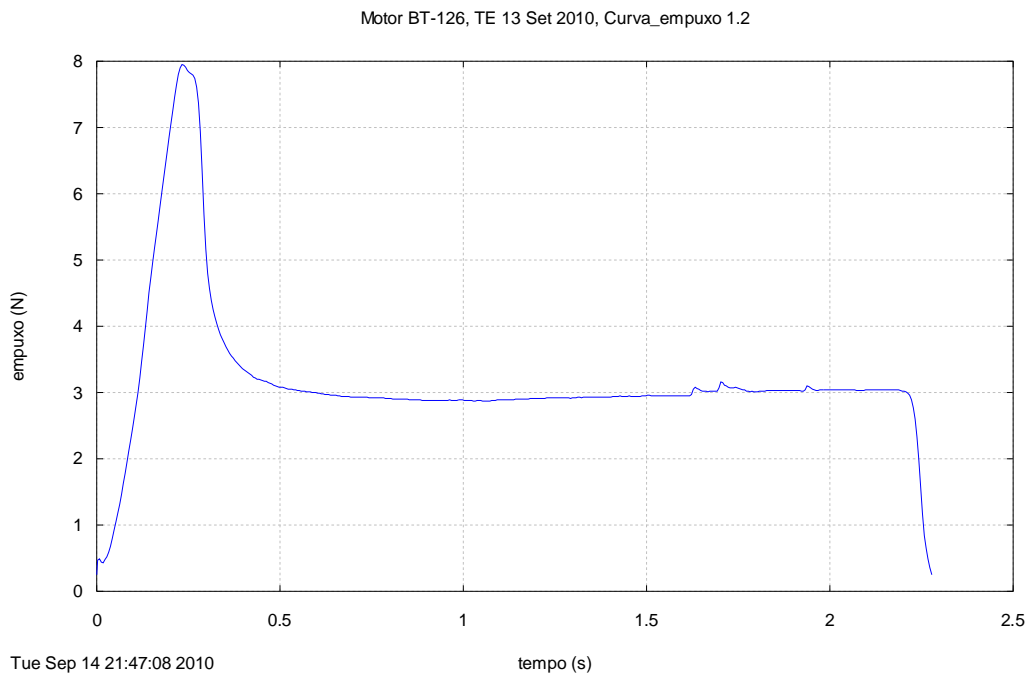
**Figura A32. Curva empuxo *versus* tempo processada do motor-foguete BT-108.**



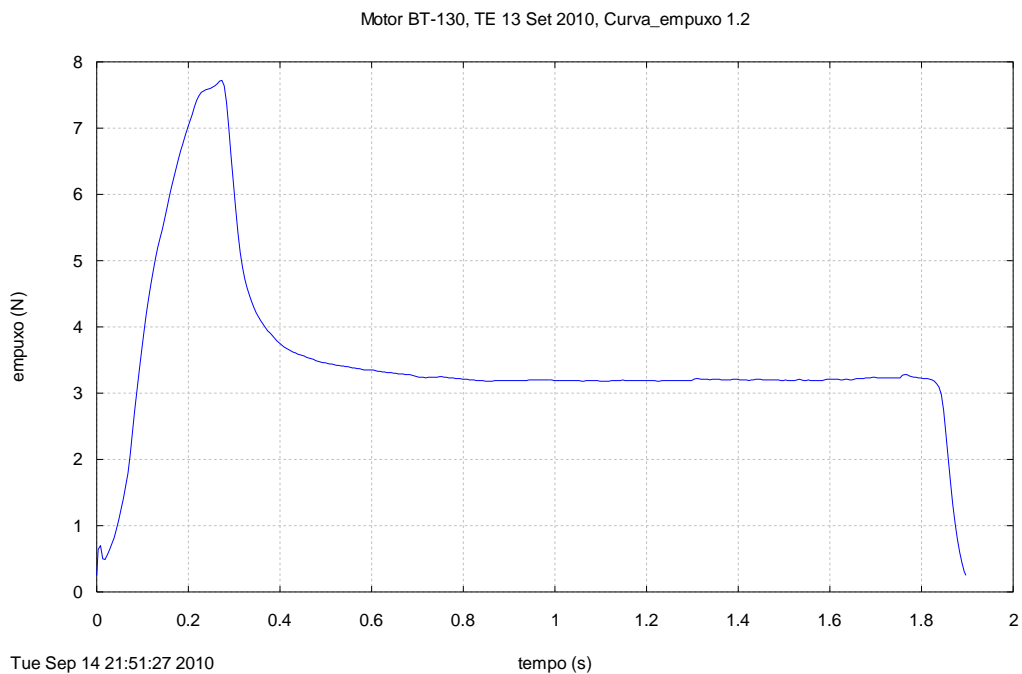
**Figura A33. Curva empuxo *versus* tempo processada do motor-foguete BT-109.**



**Figura A34. Curva empuxo *versus* tempo processada do motor-foguete BT-122.**



**Figura A35. Curva empuxo *versus* tempo processada do motor-foguete BT-126.**



**Figura A36. Curva empuxo *versus* tempo processada do motor-foguete BT-130.**

## 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-83

```
'bt83.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)
  2.301d-3 ..... M       = Massa de propelente (kg)
  9.7876d0 ..... g       = Aceleração gravitacional local (m/s2)
'curva_empuxo_lp2_BT-83_saida.txt' ..... caso = nome do arquivo de saída principal
'Motor BT-83, TE 27 Jul 2010, Curva_empuxo 1.2' ! titulo = título de identificação da análise
```

## APÊNDICE D – Resultados do aplicativo Curva\_Empuxo 1.2 para o motor BT-83

Saída do programa CURVA\_EMPUXO 1.2, versão de 9 Nov 2008

Caso = curva\_empuxo\_lp2\_BT-83\_saida.txt

Título = Motor BT-83, TE 27 Jul 2010, Curva\_empuxo 1.2

\*\*\* CURVA EMPUXO X TEMPO \*\*\*

t (s)	empuxo (N)
0.0000	0.25
0.0003	0.26
0.0053	0.61
0.0103	0.55
0.0153	0.56
0.0203	0.61
0.0253	0.70
0.0303	0.81
0.0353	0.94
0.0403	1.06
0.0453	1.21
0.0503	1.33
0.0553	1.49
0.0603	1.64
0.0653	1.81
0.0703	1.98
0.0753	2.16
0.0803	2.35
0.0853	2.56
0.0903	2.80
0.0953	3.04
0.1003	3.29
0.1053	3.49
0.1103	3.72
0.1153	3.95
0.1203	4.17
0.1253	4.36
0.1303	4.55
0.1353	4.74
0.1403	4.91
0.1453	5.07
0.1503	5.25
0.1553	5.39
0.1603	5.51
0.1653	5.64
0.1703	5.77
0.1753	5.92
0.1803	6.09
0.1853	6.28
0.1903	6.47
0.1953	6.64
0.2003	6.83
0.2053	7.00
0.2103	7.16
0.2153	7.33
0.2203	7.48
0.2253	7.62
0.2303	7.73
0.2353	7.82
0.2403	7.88
0.2453	8.01
0.2503	8.10
0.2553	8.12
0.2603	8.13
0.2653	8.18
0.2703	8.22
0.2753	8.21
0.2803	8.03
0.2853	7.61
0.2903	7.08
0.2953	6.54
0.3003	5.90
0.3053	5.18
0.3103	4.50
0.3153	3.89
0.3203	3.30

0.3253	2.78
0.3303	2.31
0.3353	1.84
0.3403	1.40
0.3453	1.03
0.3503	0.73
0.3553	0.51
0.3603	0.34
0.3644	0.25

\*\*\* Motor BT-83, TE 27 Jul 2010, Curva\_empuxo 1.2 \*\*\*

2.30 = massa de propelente (g)  
9.7876 = aceleração gravitacional local (m/s<sup>2</sup>)  
0.25 = empuxo mínimo (N)  
8.22 = empuxo máximo (N)  
5.960 = tempo original do empuxo máximo (s)  
0.270 = tempo corrigido do empuxo máximo (s)  
5.690 = tempo original inicial (s)  
6.054 = tempo original final (s)  
0.364 = tempo de queima (s)  
1.58 = impulso total (Ns)  
4.34 = empuxo médio (N)  
686.9 = velocidade de exaustão efetiva média (m/s)  
70.2 = impulso específico médio (s)  
6.31 = fluxo de massa médio (g/s)  
1.89 = razão empuxo máximo / empuxo médio  
3.04 = razão empuxo mínimo / empuxo máximo (%)  
classificação do motor = A 4