

Testes estáticos de 14 Abr 2011 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, 7 de junho de 2011.

1 INTRODUÇÃO

Este relatório descreve 11 testes estáticos com motores-foguete de espaçomodelos a propelente sólido do tipo BT (Bandeirante) da classe C6-5, realizados em 14 de abril de 2011 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 a curva de empuxo *versus* tempo e parâmetros de desempenho desta classe de motor-foguete; (2) determinar o tempo entre a ignição e a ejeção, tanto através de vídeo quanto sensor de força; (3) verificar a incerteza do desempenho deste motor; e (4) incluir neste relatório os resultados dos testes feitos em 2010 com a mesma classe de motor.

2 DESCRIÇÃO DOS MOTORES-FOGUETE

A Figura 1 mostra os 11 motores-foguete da classe C6-5 testados em 14 Abr 2011, designados por BT-132 a BT-142. Na Figura 4 de Marchi (2010) são mostrados os 13 motores-foguete da classe C6-5 testados em 27 Jul e 13 Set 2010. A definição de classe do motor segue a classificação da NAR (2004). A estrutura externa de cada motor é um tubo de papelão cilíndrico circular (Figura 1). Internamente, os motores C6-5 têm uma tubeira (Figura 2), carga propulsora de pólvora negra, carga temporizadora (Figura 3), carga ejetora (Figura 3) e tampa de fechamento de isopor (Figura 3). Todos os motores foram fabricados pela Bandeirante (Boa Vista Modelismo Ltda.), de São Lourenço da Mata (PE), em fevereiro de 2010, e são de um lote de 100 motores.



Figura 1. Foto mostrando os motores-foguete BT do tipo C6-5 na vertical.

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 conforme recebido do fabricante; M_a = massa do motor após a retirada da sua carga ejetora e da sua tampa de isopor; M_e = massa da carga ejetora; M_i = massa da tampa de isopor; M_f = massa do motor após a queima das cargas propulsora

e temporizadora, e sem a tampa; M_{pt} = massa da carga propulsora + carga temporizadora; e M_{tc} = massa total consumida.



Figura 2. Foto mostrando as tubeiras dos motores-foguete BT do tipo C6-5 na horizontal.

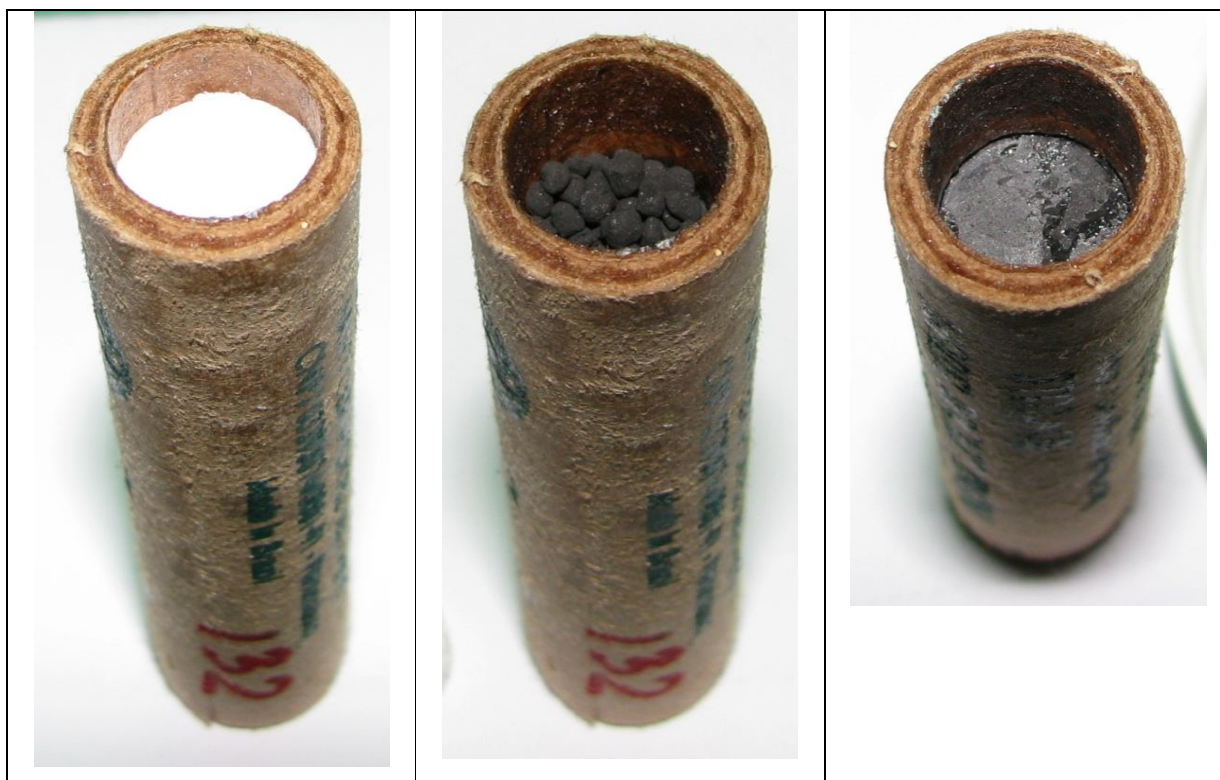


Figura 3. Fotos mostrando a tampa de fechamento, a carga ejetora e a carga temporizadora dos motores-foguete BT do tipo C6-5 na vertical.

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 (Figura 5 de Marchi, 2010), com escala de 150 mm e menor divisão de escala de 0,01 mm. M_o , M_a , M_e , M_i e M_f foram medidos com uma balança Marte AY220 (Figura 6 de Marchi, 2010), com menor divisão de escala de 0,0001 g e erro máximo de 0,001 g. M_{pt} e M_{tc} foram calculados através das seguintes equações:

$$M_{pt} = M_a - M_f \quad (1)$$

$$M_{tc} = M_o - M_f \quad (2)$$

Na Tabela 1 também são incluídos os dados pertinentes dos 13 motores C6-5 testados em 2010 e designados por BT-110 a BT-119, BT-123, BT-127 e BT-131.

Tabela 1. Dimensões e massas de cada motor-foguete da classe C6-5.

Motor	De (mm)	Lt (mm)	Mo (g)	Ma (g)	Me (g)	Mi (g)	Mf (g)	Mpt (g)	Mtc (g)
BT-132	17,83	80,91	24,084	23,863	0,179	0,016	11,897	11,966	12,187
BT-133	17,63	80,00	22,713	22,470	0,172	0,017	11,536	10,934	11,177
BT-134	17,84	80,84	21,693	21,437	0,175	0,016	10,866	10,571	10,827
BT-135	17,62	78,23	22,771	22,517	0,191	0,017	11,506	11,011	11,265
BT-136	17,62	78,85	23,088	22,858	0,164	0,015	11,627	11,231	11,461
BT-137	17,57	78,16	23,662	23,415	0,179	0,015	11,338	12,077	12,324
BT-138	17,62	81,40	22,850	22,603	0,170	0,014	11,272	11,331	11,578
BT-139	17,42	80,60	22,587	22,342	0,165	0,018	11,533	10,809	11,054
BT-140	17,69	75,94	23,119	22,886	0,159	0,016	11,685	11,201	11,434
BT-141	17,78	79,05	23,175	22,928	0,173	0,014	12,051	10,877	11,124
BT-142	17,62	76,77	21,818	21,550	0,154	0,016	10,572	10,978	11,246
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

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 conjunto de motores indicados. 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).

3 DESCRIÇÃO DOS TESTES ESTÁTICOS

Antes de realizar os testes, foram retiradas a tampa de isopor e a carga ejetora de cada motor para não danificar a célula de carga. Os 11 testes estáticos foram realizados em 14 de abril de 2011 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 <http://www.foguete.ufpr.br> (2011). Os testes foram executados entre 9:45 e 10:24 h, quando a temperatura ambiente variou entre 21,1 e 22,4 °C e a pressão atmosférica entre 90,76 e

90,79 kPa. As temperaturas e pressões foram medidas com o altímetro RA123 da Oregon Venture (Figura 6 de Marchi, 2010). Não houve nenhum problema durante a realização dos 24 testes estáticos dos motores C6-5 mencionados na Tabela 1, isto é, não houve: explosão do motor, ejeção da tubeira ou das cargas, falha de funcionamento, ou funcionamento inesperado ou irregular.

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

Motores	C6-5/2010	C6-5/2011	C6-5/2010 e 2011
De (mm)	17,60	17,66	17,63
U de De (mm)	0,56	0,27	0,42
U de De (%)	3,2	1,5	2,4
Lt (mm)	79,3	79,2	79,2
U de Lt (mm)	2,6	4,0	3,0
U de Lt (%)	3,3	5,0	3,8
Mo (g)	22,8	22,9	22,8
U de Mo (g)	2,0	1,6	1,7
U de Mo (%)	8,6	6,8	7,2
Ma (g)	-	22,6	-
U de Ma (g)	-	1,6	-
U de Ma (%)	-	7,0	-
Me (g)	-	0,171	-
U de Me (g)	-	0,023	-
U de Me (%)	-	13	-
Mi (g)	-	0,016	-
U de Mi (g)	-	0,003	-
U de Mi (%)	-	18	-
Mf (g)	11,6	11,44	11,5
U de Mf (g)	1,6	0,95	1,2
U de Mf (%)	14	8,3	11
Mpt (g)	-	11,2	-
U de Mpt (g)	-	1,0	-
U de Mpt (%)	-	9,3	-
Mtc (g)	11,2	11,4	11,18
U de Mtc (g)	1,0	1,0	0,96
U de Mtc (%)	9,3	9,0	8,6

Foram empregados ignitores fabricados em outubro de 2009 pela Bandeirante (Figura 7 de Marchi, 2010). 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 de Marchi, 2010).

A bancada experimental usada durante cada teste estático pode ser vista na Figura 4. 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 4.



Figura 4. Foto da bancada experimental usada com os motores C6-5, mostrando a célula de carga S2-50 da HBM e o motor BT-133 durante a queima da sua carga propulsora.

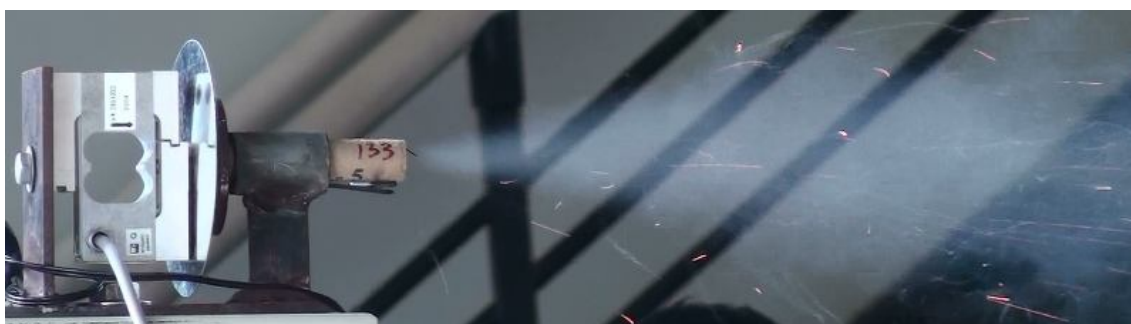


Figura 5. Foto mostrando o motor BT-133 durante a queima da sua carga temporizadora.



Figura 6. Foto mostrando o motor BT-133 no fim da queima da sua carga temporizadora.

4 RESULTADOS

As Figuras 4 a 6 mostram três momentos do funcionamento do motor BT-133. A Figura 7 mostra todos os motores e suas tubeiras após seus testes estáticos. A Figura 8 mostra o motor BT-132, após seu teste estático, onde pode-se ver resíduos da combustão em sua parte superior. As

imagens deste relatório foram captadas por uma câmara fotográfica Canon PowerShot S51S, de 8 megapixels (Figuras 1 a 3, e 7 e 8), e por uma filmadora Sony HDR-SR10, de 4 megapixels (Figuras 4 a 6) 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 7. Foto mostrando os motores na horizontal e suas tubeiras após seus testes estáticos.



Figura 8. Foto mostrando o motor BT-132 na vertical e sua extremidade superior após seu teste estático, observando-se resíduos da combustão.

As Figuras A1 a A11, 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). Não houve empuxo mensurável durante a queima da carga temporizadora.

Na Tabela 3 são apresentados os resultados obtidos com o aplicativo computacional Curva_Empuxo 1.2, de 9 Nov 2008, com base em dados obtidos através da célula de carga da HBM. Este aplicativo também foi usado na obtenção das curvas mostradas nas Figuras A1 a A11. 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-142, e no Apêndice D, os respectivos resultados obtidos pelo aplicativo. Não são apresentados aqui resultados que dependem da massa da carga propulsora pois ela é desconhecida.

Tabela 3. Resultados das curvas de empuxo.

Motor	tqpe (s)	It (Ns)	Emed (N)	E_{max} (N)	Classe
BT-132	2,200	7,99	3,63	9,75	C4
BT-133	1,910	7,46	3,91	7,19	C4
BT-134	1,791	7,13	3,98	8,20	C4
BT-135	1,942	7,09	3,65	7,79	C4
BT-136	1,899	7,26	3,82	7,37	C4
BT-137	2,228	8,64	3,88	7,52	C4
BT-138	1,924	7,23	3,76	7,42	C4
BT-139	1,936	7,47	3,86	9,79	C4
BT-140	1,963	7,37	3,76	9,83	C4
BT-141	1,888	7,45	3,94	6,84	C4
BT-142	1,925	7,22	3,75	7,07	C4

O significado dos símbolos da Tabela 3 é o seguinte: tqpe = tempo de queima da carga propulsora, medido com célula de carga para empuxo $\geq 0,25$ N; It = impulso total; Emed = empuxo médio; e E_{max} = empuxo máximo. Os valores de tqpe e E_{max} foram obtidos diretamente de cada curva empuxo *versus* tempo processada. Os demais parâmetros foram obtidos por meio das seguintes equações:

$$It = \int_0^{tqpe} E dt \quad (3)$$

$$Emed = \frac{It}{tqpe} \quad (4)$$

Na Eq. (3), 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 11 motores testados se enquadram em uma única classe, conforme o intervalo de impulso total: C = 5,01 a 10,00 Ns. Este intervalo e letra 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.

Na Tabela 4 são apresentados os resultados obtidos das filmagens dos testes estáticos de 2010 e 2011 dos motores C6-5. O significado dos termos da Tabela 4 é: tqpf = tempo de queima da carga propulsora filmado; tqtf = tempo de queima da carga temporizadora filmado; tejf = tempo de ejeção, que é o tempo entre o início da queima da carga propulsora e o fim da queima da carga temporizadora, ou seja,

$$tejf = tqpf + tqtf \quad (5)$$

O segundo número na coluna Classe, na Tabela 4, representa o valor do tempo de queima da carga temporizadora arredondado para um número inteiro. Os 24 motores se enquadram em três valores: 3, 4 e 6. A razão entre tqpf e tqpe, mostrada na última coluna da Tabela 4, mostra que o tempo de queima da carga propulsora com empuxo $\geq 0,25$ N é um pouco menor do que o tempo de queima visual, ou seja, aquele em que o motor ejeta gases em combustão, o que é coerente. Além disso, a diferença entre tqpf e tqpe é de 1 a 3 quadros da filmadora. Portanto, é possível que esta diferença fosse menor se as filmagens tivessem uma resolução maior.

Tabela 4. Resultados das filmagens.

Motor	tqpf (s)	tqtf (s)	tejf (s)	Classe	tqpf/tqpe
BT-132	2,233	2,933	5,166	C4-3	1,015
BT-133	1,933	3,433	5,366	C4-3	1,012
BT-134	1,867	3,667	5,534	C4-4	1,042
BT-135	1,967	3,433	5,400	C4-3	1,013
BT-136	1,967	3,667	5,634	C4-4	1,036
BT-137	2,267	2,600	4,867	C4-3	1,018
BT-138	2,000	3,933	5,933	C4-4	1,040
BT-139	2,000	3,167	5,167	C4-3	1,033
BT-140	2,000	3,800	5,800	C4-4	1,019
BT-141	1,967	3,467	5,434	C4-3	1,042
BT-142	2,000	3,567	5,567	C4-4	1,039
BT-110	2,067	3,600	5,667	??-4	-
BT-111	1,933	4,367	6,300	??-4	-
BT-112	2,100	4,033	6,133	??-4	-
BT-113	1,933	3,233	5,166	??-3	-
BT-114	2,033	3,667	5,700	??-4	-
BT-115	2,033	3,600	5,633	??-4	-
BT-116	1,867	5,967	7,834	??-6	-
BT-117	1,933	3,467	5,400	??-3	-
BT-118	1,967	4,133	6,100	??-4	-
BT-119	1,933	4,100	6,033	??-4	-
BT-123	2,033	4,033	6,066	??-4	-
BT-127	1,967	3,800	5,767	??-4	-
BT-131	1,867	3,100	4,967	??-3	-

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 conjunto de motores indicados. A incerteza expandida (U) foi obtida através do procedimento descrito em ABNT (1997), que considera: fator de abrangência k de acordo com o número de graus de liberdade (número de dados menos a unidade) de cada parâmetro; e distribuição t para nível de confiança de 95%, conforme recomendação de JHT (1993).

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

Motores	C6-5/2010	C6-5/2011	C6-5/2010 e 2011
Classe	??-4	C4-3	??-4
tqpe (s)	?	1,96	?
U de tq (s)	?	0,29	?
U de tq (%)	?	15	?
It (Ns)	?	7,5	?
U de It (Ns)	?	1,0	?
U de It (%)	?	14	?
Emed (N)	?	3,81	?
U de Emed (N)	?	0,25	?
U de Emed (%)	?	6,7	?
Emax (N)	?	8,1	?
U de Emax (N)	?	2,6	?
U de Emax (%)	?	32	?
tqpf (s)	1,97	2,02	1,99
U de tqpf (s)	0,16	0,27	0,20
U de tqpf (%)	8,1	13	10
tqtf (s)	3,9	3,42	3,7
U de tqtf (s)	1,6	0,87	1,3
U de tqtf (%)	40	25	35
tejf (s)	5,9	5,44	5,7
U de tejf (s)	1,5	0,68	1,2
U de tejf (%)	26	12	22
tqpf/tqpe	?	1,028	?
U de tqpf/tqpe	?	0,028	?
U de tqpf/tqpe	?	2,7	?

5 CONCLUSÃO

De acordo com a metodologia adotada neste relatório, e com base nos testes e análises realizados, conclui-se que:

- 1) O motor Bandeirante C6-5, do lote usado, tem desempenho equivalente a um motor C4-4, e é seguro.
- 2) $tqpe = 1,96 \pm 0,29$ s.
- 3) $It = 7,5 \pm 1,0$ Ns.
- 4) $Emed = 3,81 \pm 0,25$ N.
- 5) $tejf = 5,7 \pm 1,2$ s.
- 6) $Mo = 22,8 \pm 1,7$ g.

- 7) $M_f = 11,5 \pm 1,2$ g.
- 8) Durante a queima da carga temporizadora não há empuxo mensurável.

Agradecimentos

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.

<http://www.foguete.ufpr.br> (2011).

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

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

MARCHI, C. H. **Testes estáticos de 27 Jul e 13 Set 2010 de motores-foguete do tipo BT de espaçomodelos**. Curitiba: Universidade Federal do Paraná, 2010.

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

www.nar.org (2010).

www.thrustcurve.org (2010).

APÊNDICE A – curvas de empuxo x tempo

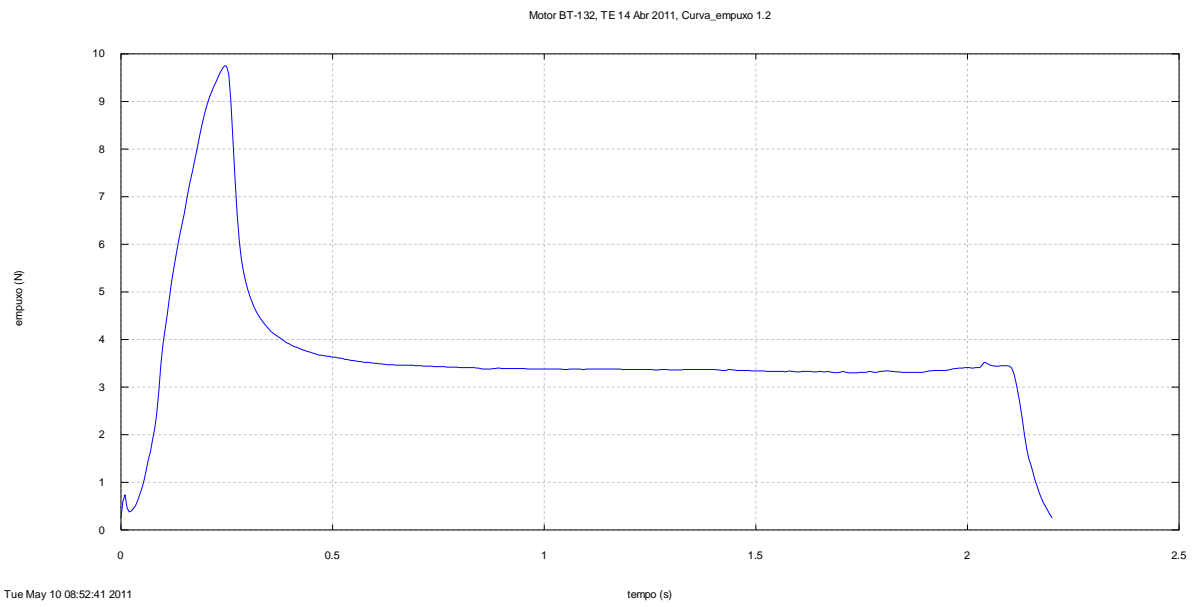


Figura A1. Curva empuxo *versus* tempo processada do motor-foguete BT-132.

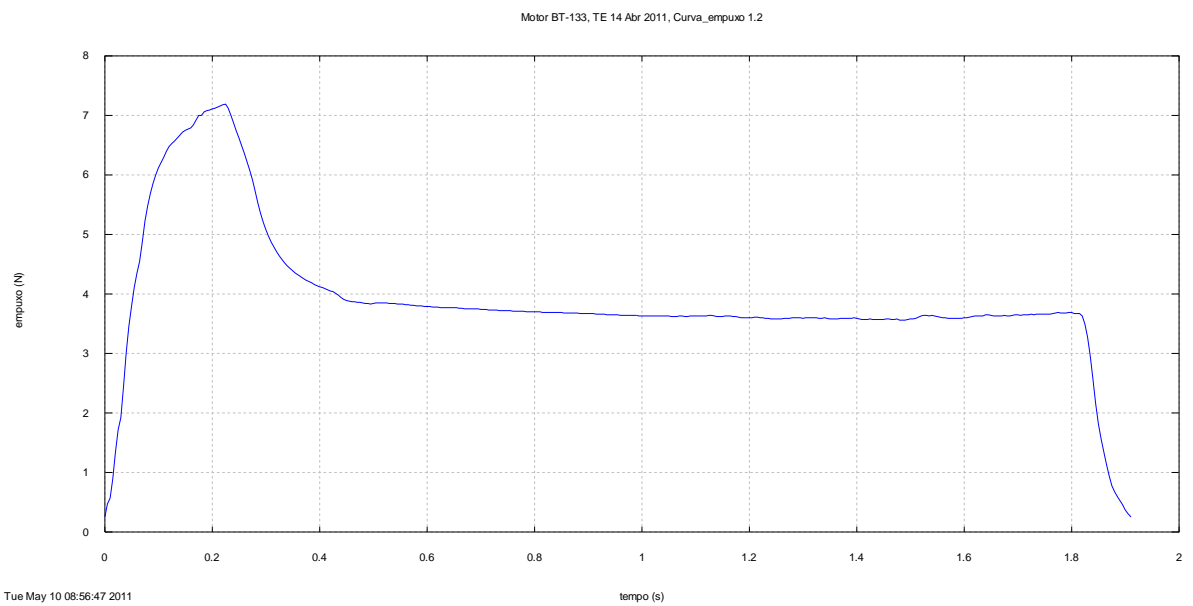


Figura A2. Curva empuxo *versus* tempo processada do motor-foguete BT-133.

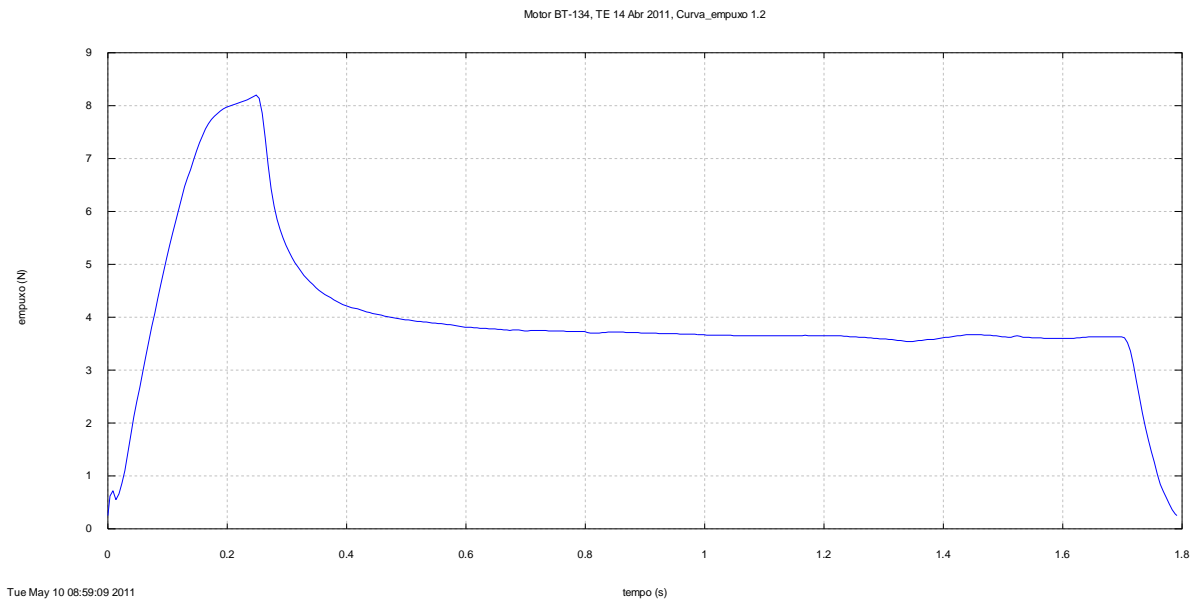


Figura A3. Curva empuxo *versus* tempo processada do motor-foguete BT-134.

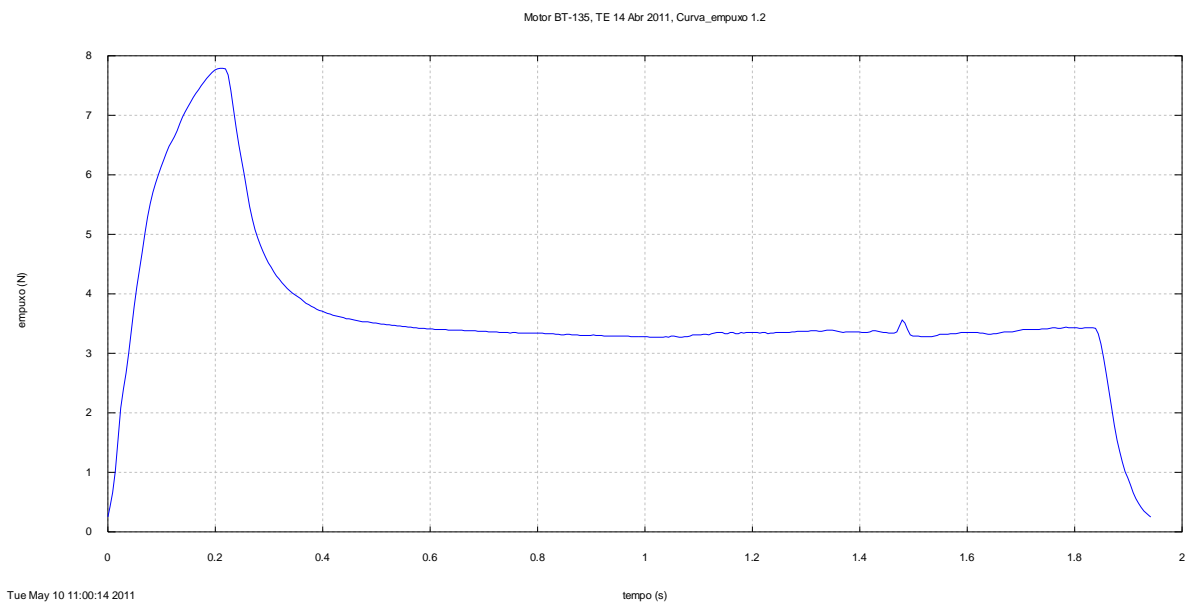


Figura A4. Curva empuxo *versus* tempo processada do motor-foguete BT-135.

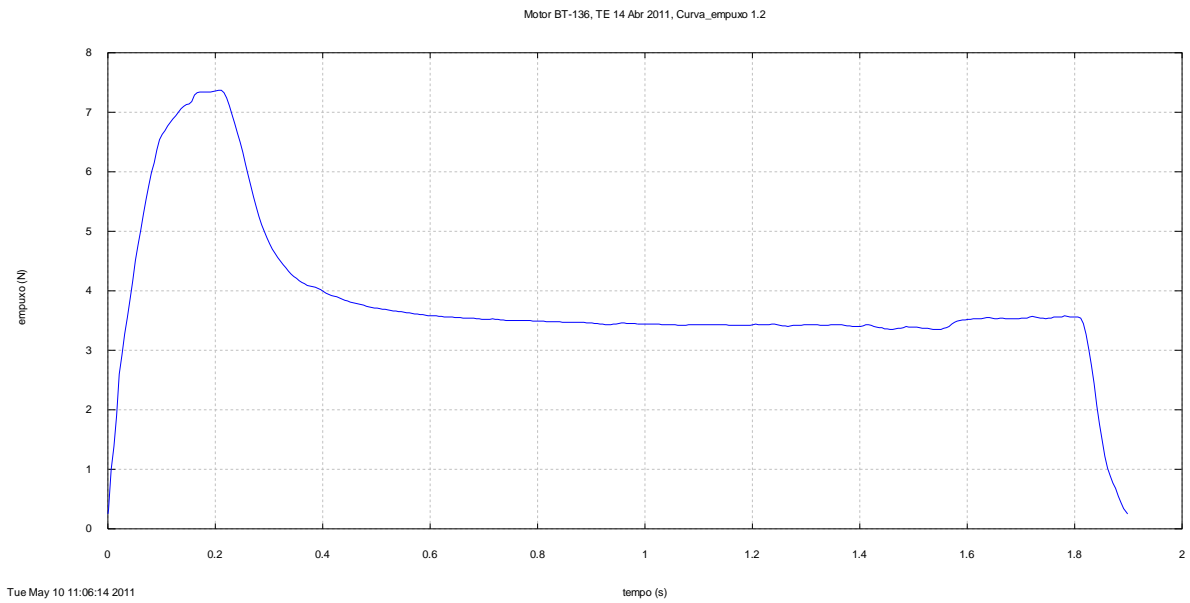


Figura A5. Curva empuxo *versus* tempo processada do motor-foguete BT-136.

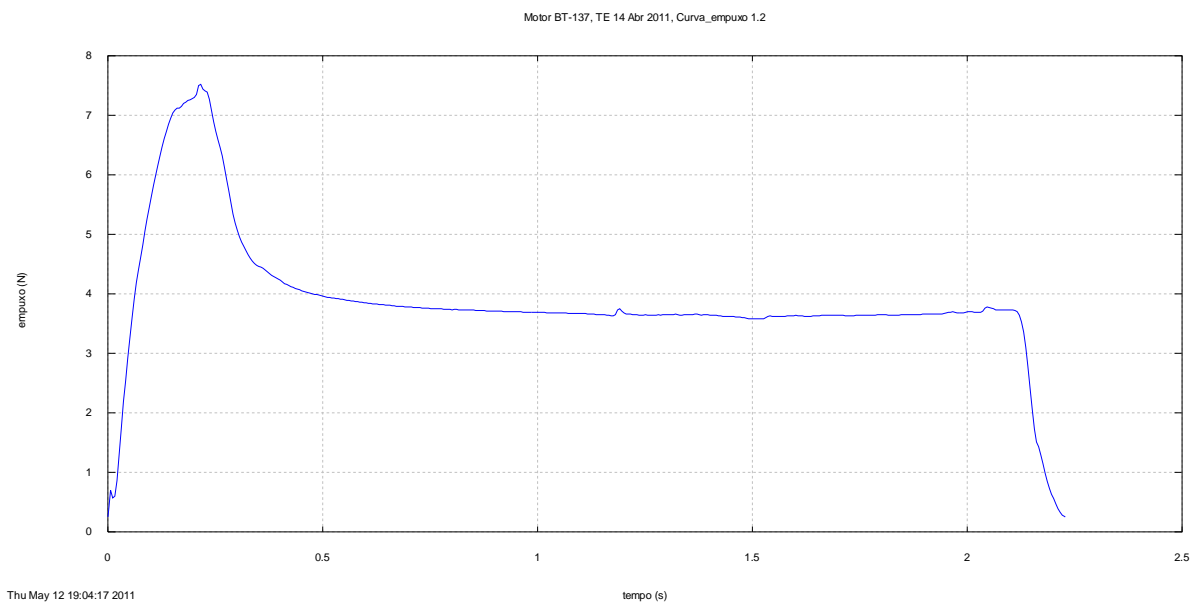


Figura A6. Curva empuxo *versus* tempo processada do motor-foguete BT-137.

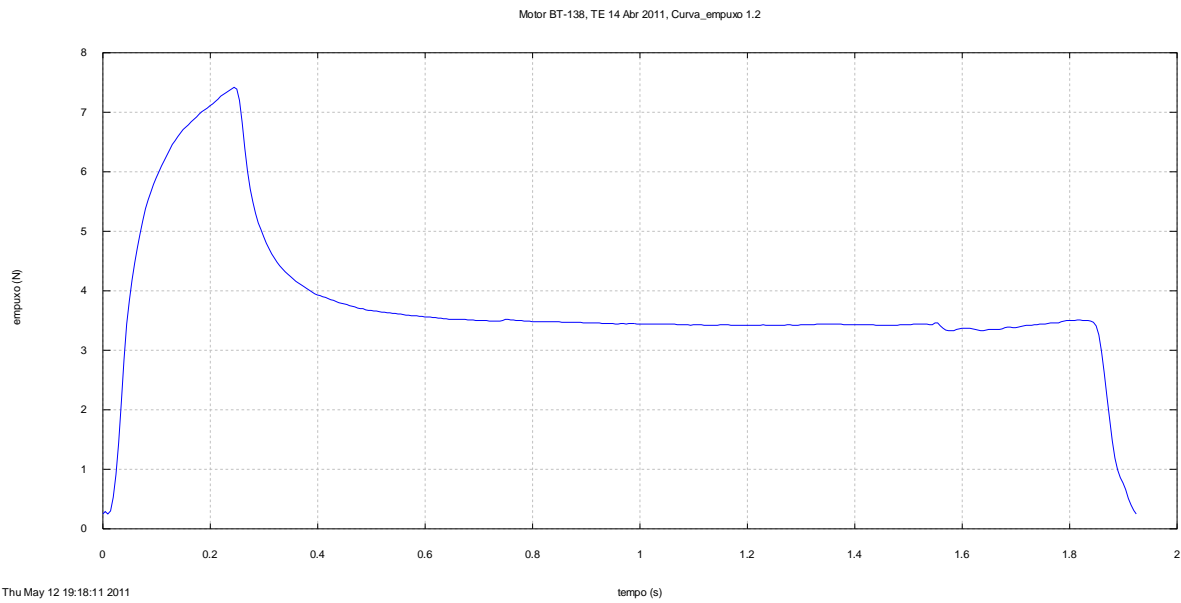


Figura A7. Curva empuxo *versus* tempo processada do motor-foguete BT-138.

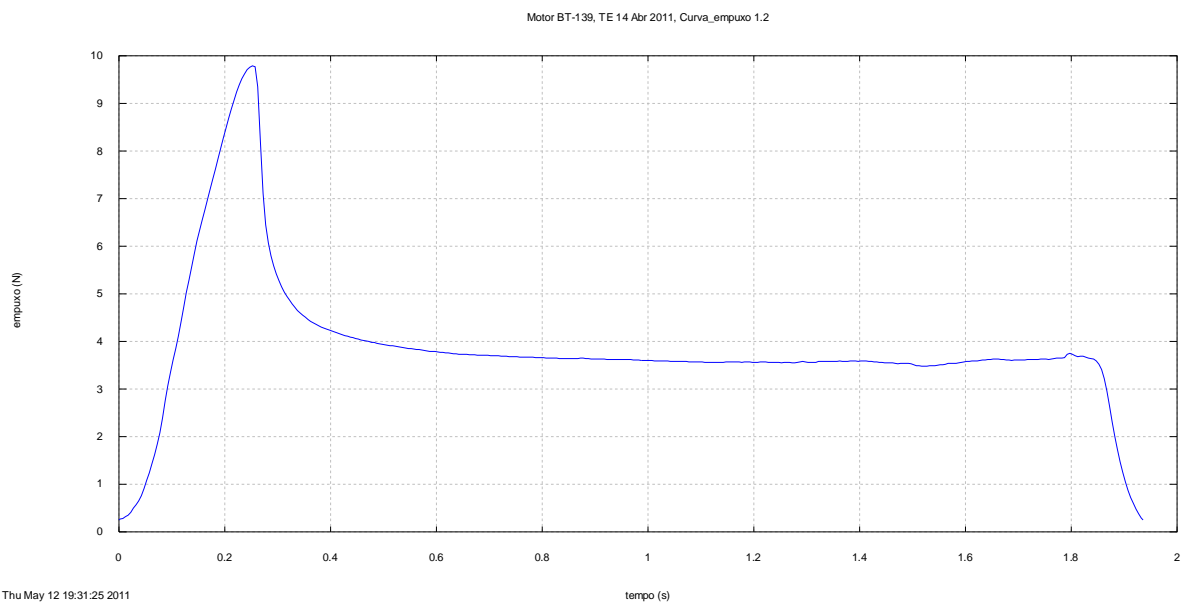


Figura A8. Curva empuxo *versus* tempo processada do motor-foguete BT-139.

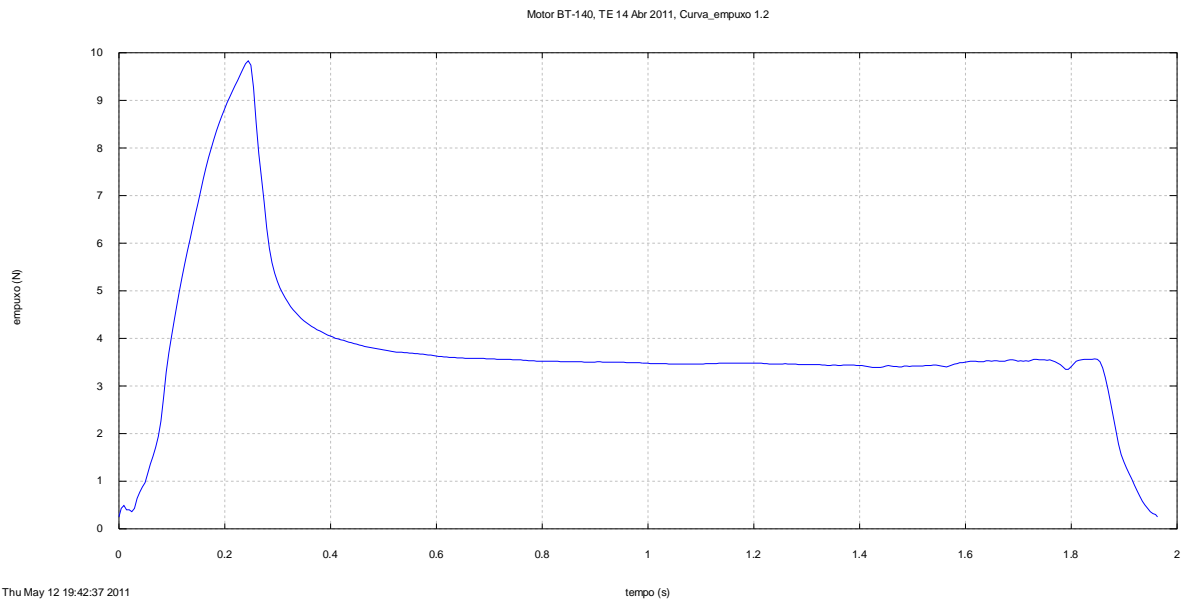


Figura A9. Curva empuxo *versus* tempo processada do motor-foguete BT-140.

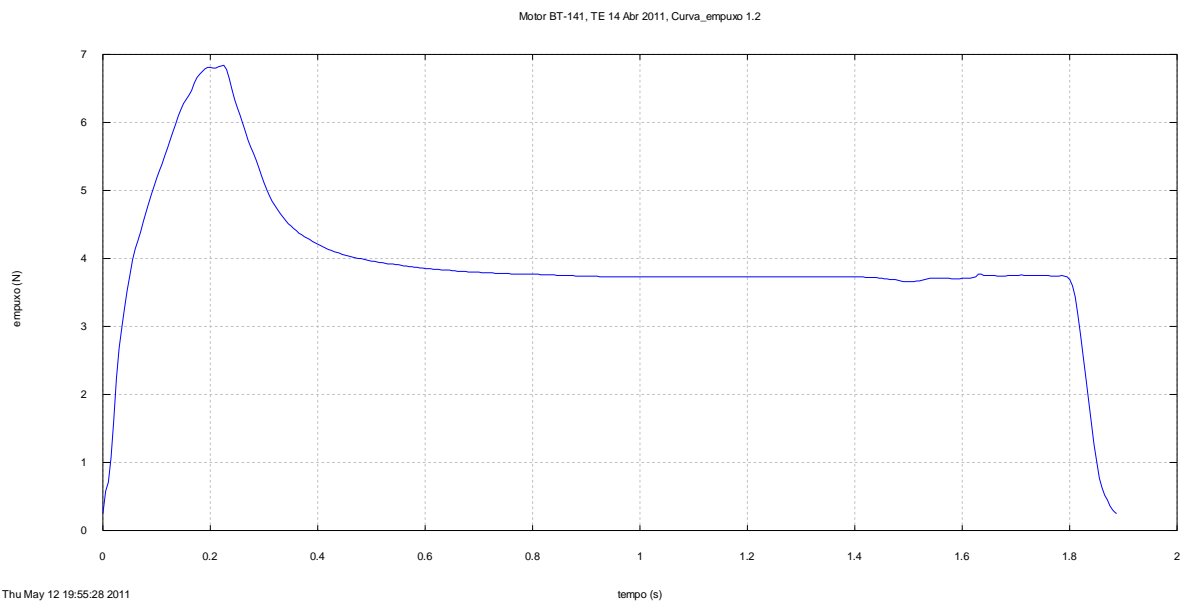


Figura A10. Curva empuxo *versus* tempo processada do motor-foguete BT-141.

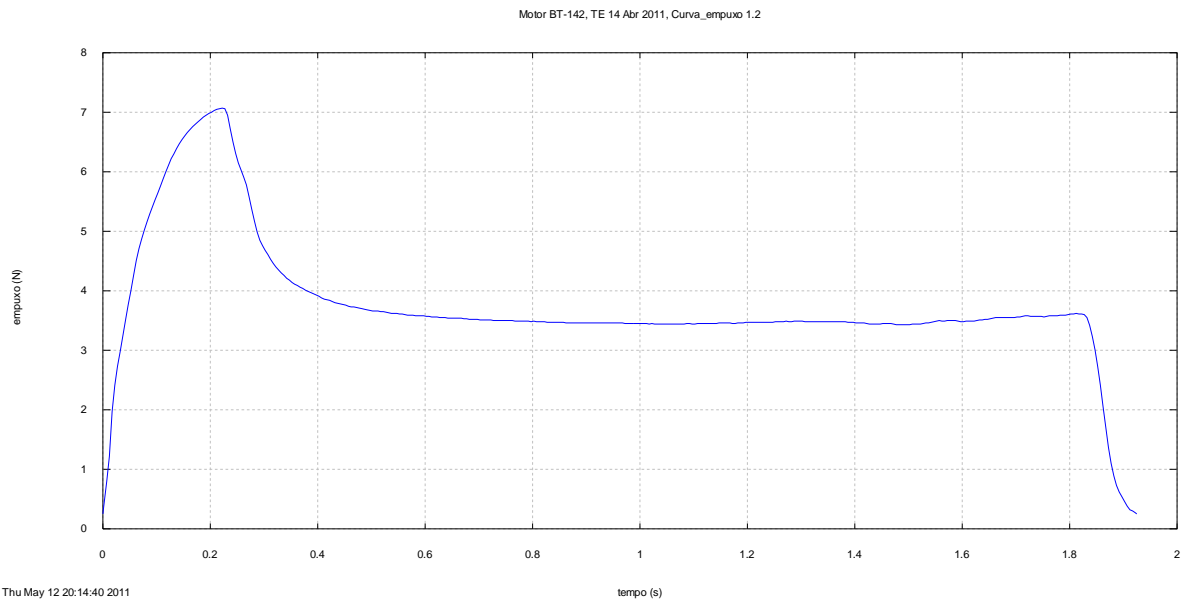


Figura A11. Curva empuxo *versus* tempo processada do motor-foguete BT-142.

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-142

```
'bt142.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)
  9.640d-3 ..... M     = Massa de propelente (kg)
  9.7876d0 ..... g     = Aceleração gravitacional local (m/s2)
'curva_empuxo_lp2_BT-142_saida.txt' ..... caso = nome do arquivo de saída principal
'Motor BT-142, TE 14 Abr 2011, Curva_empuxo 1.2' ! titulo = título de identificação da análise
```

APÊNDICE D – Resultados do aplicativo Curva_Empuxo 1.2 para o motor BT-142

Saída do programa CURVA_EMPUXO 1.2, versão de 9 Nov 2008

Caso = curva_empuxo_lp2_BT-142_saida.txt

Título = Motor BT-142, TE 14 Abr 2011, Curva_empuxo 1.2

*** CURVA EMPUXO X TEMPO ***

t (s)	empuxo (N)
0.0000	0.25
0.0022	0.42
0.0072	0.80
0.0122	1.22
0.0172	1.97
0.0222	2.41
0.0272	2.73
0.0322	2.98
0.0372	3.24
0.0422	3.51
0.0472	3.77
0.0522	4.00
0.0572	4.26
0.0622	4.51
0.0672	4.71
0.0722	4.87
0.0772	5.02
0.0822	5.16
0.0872	5.29
0.0922	5.41
0.0972	5.53
0.1022	5.64
0.1072	5.76
0.1122	5.88
0.1172	6.00
0.1222	6.11
0.1272	6.22
0.1322	6.30
0.1372	6.39
0.1422	6.47
0.1472	6.54
0.1522	6.60
0.1572	6.66
0.1622	6.71
0.1672	6.76
0.1722	6.80
0.1772	6.84
0.1822	6.88
0.1872	6.92
0.1922	6.95
0.1972	6.98
0.2022	7.00
0.2072	7.03
0.2122	7.05
0.2172	7.06
0.2222	7.07
0.2272	7.06
0.2322	6.95
0.2372	6.72
0.2422	6.50
0.2472	6.31
0.2522	6.15
0.2572	6.03
0.2622	5.91
0.2672	5.78
0.2722	5.58
0.2772	5.37
0.2822	5.17
0.2872	4.99
0.2922	4.85
0.2972	4.76
0.3022	4.68
0.3072	4.61
0.3122	4.53
0.3172	4.46
0.3222	4.40

0.3272	4.35
0.3322	4.30
0.3372	4.26
0.3422	4.21
0.3472	4.18
0.3522	4.14
0.3572	4.11
0.3622	4.09
0.3672	4.06
0.3722	4.04
0.3772	4.01
0.3822	3.99
0.3872	3.97
0.3922	3.95
0.3972	3.93
0.4022	3.91
0.4072	3.88
0.4122	3.86
0.4172	3.85
0.4222	3.84
0.4272	3.82
0.4322	3.80
0.4372	3.79
0.4422	3.78
0.4472	3.77
0.4522	3.76
0.4572	3.74
0.4622	3.73
0.4672	3.73
0.4722	3.72
0.4772	3.71
0.4822	3.70
0.4872	3.69
0.4922	3.68
0.4972	3.67
0.5022	3.66
0.5072	3.66
0.5122	3.66
0.5172	3.65
0.5222	3.65
0.5272	3.64
0.5322	3.63
0.5372	3.62
0.5422	3.62
0.5472	3.62
0.5522	3.61
0.5572	3.61
0.5622	3.60
0.5672	3.59
0.5722	3.59
0.5772	3.59
0.5822	3.58
0.5872	3.58
0.5922	3.58
0.5972	3.58
0.6022	3.57
0.6072	3.57
0.6122	3.56
0.6172	3.56
0.6222	3.56
0.6272	3.55
0.6322	3.55
0.6372	3.55
0.6422	3.54
0.6472	3.54
0.6522	3.54
0.6572	3.54
0.6622	3.54
0.6672	3.54
0.6722	3.53
0.6772	3.53
0.6822	3.52
0.6872	3.52
0.6922	3.52
0.6972	3.52
0.7022	3.51
0.7072	3.51
0.7122	3.51
0.7172	3.51
0.7222	3.51

0.7272	3.50
0.7322	3.50
0.7372	3.50
0.7422	3.50
0.7472	3.50
0.7522	3.50
0.7572	3.50
0.7622	3.50
0.7672	3.49
0.7722	3.49
0.7772	3.49
0.7822	3.49
0.7872	3.49
0.7922	3.49
0.7972	3.48
0.8022	3.49
0.8072	3.48
0.8122	3.48
0.8172	3.48
0.8222	3.48
0.8272	3.47
0.8322	3.47
0.8372	3.47
0.8422	3.47
0.8472	3.47
0.8522	3.47
0.8572	3.47
0.8622	3.46
0.8672	3.46
0.8722	3.46
0.8772	3.46
0.8822	3.46
0.8872	3.46
0.8922	3.46
0.8972	3.46
0.9022	3.46
0.9072	3.46
0.9122	3.46
0.9172	3.46
0.9222	3.46
0.9272	3.46
0.9322	3.46
0.9372	3.46
0.9422	3.46
0.9472	3.46
0.9522	3.46
0.9572	3.46
0.9622	3.46
0.9672	3.46
0.9722	3.45
0.9772	3.45
0.9822	3.45
0.9872	3.45
0.9922	3.45
0.9972	3.45
1.0022	3.45
1.0072	3.45
1.0122	3.45
1.0172	3.44
1.0222	3.45
1.0272	3.44
1.0322	3.44
1.0372	3.44
1.0422	3.44
1.0472	3.44
1.0522	3.44
1.0572	3.44
1.0622	3.44
1.0672	3.44
1.0722	3.44
1.0772	3.44
1.0822	3.44
1.0872	3.45
1.0922	3.45
1.0972	3.44
1.1022	3.44
1.1072	3.45
1.1122	3.45
1.1172	3.45
1.1222	3.45

1.1272	3.45
1.1322	3.45
1.1372	3.45
1.1422	3.45
1.1472	3.46
1.1522	3.46
1.1572	3.46
1.1622	3.46
1.1672	3.46
1.1722	3.45
1.1772	3.45
1.1822	3.46
1.1872	3.46
1.1922	3.46
1.1972	3.47
1.2022	3.47
1.2072	3.47
1.2122	3.47
1.2172	3.47
1.2222	3.47
1.2272	3.47
1.2322	3.47
1.2372	3.47
1.2422	3.47
1.2472	3.47
1.2522	3.48
1.2572	3.48
1.2622	3.48
1.2672	3.48
1.2722	3.49
1.2772	3.48
1.2822	3.48
1.2872	3.49
1.2922	3.49
1.2972	3.49
1.3022	3.49
1.3072	3.48
1.3122	3.48
1.3172	3.48
1.3222	3.48
1.3272	3.48
1.3322	3.48
1.3372	3.48
1.3422	3.48
1.3472	3.48
1.3522	3.48
1.3572	3.48
1.3622	3.48
1.3672	3.48
1.3722	3.48
1.3772	3.48
1.3822	3.48
1.3872	3.47
1.3922	3.47
1.3972	3.47
1.4022	3.46
1.4072	3.46
1.4122	3.46
1.4172	3.46
1.4222	3.45
1.4272	3.44
1.4322	3.44
1.4372	3.44
1.4422	3.44
1.4472	3.44
1.4522	3.45
1.4572	3.45
1.4622	3.45
1.4672	3.45
1.4722	3.44
1.4772	3.43
1.4822	3.43
1.4872	3.43
1.4922	3.43
1.4972	3.43
1.5022	3.43
1.5072	3.44
1.5122	3.44
1.5172	3.44
1.5222	3.44

1.5272	3.45
1.5322	3.46
1.5372	3.46
1.5422	3.47
1.5472	3.48
1.5522	3.49
1.5572	3.50
1.5622	3.49
1.5672	3.49
1.5722	3.50
1.5772	3.50
1.5822	3.50
1.5872	3.50
1.5922	3.49
1.5972	3.48
1.6022	3.48
1.6072	3.49
1.6122	3.49
1.6172	3.49
1.6222	3.49
1.6272	3.50
1.6322	3.51
1.6372	3.51
1.6422	3.52
1.6472	3.52
1.6522	3.53
1.6572	3.54
1.6622	3.55
1.6672	3.55
1.6722	3.55
1.6772	3.55
1.6822	3.55
1.6872	3.55
1.6922	3.55
1.6972	3.55
1.7022	3.56
1.7072	3.56
1.7122	3.57
1.7172	3.58
1.7222	3.58
1.7272	3.57
1.7322	3.57
1.7372	3.57
1.7422	3.57
1.7472	3.57
1.7522	3.56
1.7572	3.57
1.7622	3.58
1.7672	3.58
1.7722	3.58
1.7772	3.58
1.7822	3.59
1.7872	3.59
1.7922	3.59
1.7972	3.60
1.8022	3.61
1.8072	3.61
1.8122	3.62
1.8172	3.61
1.8222	3.61
1.8272	3.60
1.8322	3.55
1.8372	3.42
1.8422	3.23
1.8472	3.01
1.8522	2.73
1.8572	2.41
1.8622	2.05
1.8672	1.71
1.8722	1.37
1.8772	1.10
1.8822	0.89
1.8872	0.73
1.8922	0.62
1.8972	0.54
1.9022	0.46
1.9072	0.38
1.9122	0.32
1.9172	0.30
1.9222	0.27

1.9249 0.25

*** Motor BT-142, TE 14 Abr 2011, Curva_empuxo 1.2 ***

9.64 = massa de propelente (g)

9.7876 = aceleração gravitacional local (m/s²)

0.25 = empuxo mínimo (N)

7.07 = empuxo máximo (N)

7.025 = tempo original do empuxo máximo (s)

0.222 = tempo corrigido do empuxo máximo (s)

6.803 = tempo original inicial (s)

8.728 = tempo original final (s)

1.925 = tempo de queima (s)

7.22 = impulso total (Ns)

3.75 = empuxo médio (N)

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

76.5 = impulso específico médio (s)

5.01 = fluxo de massa médio (g/s)

1.88 = razão empuxo máximo / empuxo médio

3.54 = razão empuxo mínimo / empuxo máximo (%)

classificação do motor = C 4