



*Testes estáticos de motores-foguete a propelente
sólido de espaçomodelos de 5 Out 2006*

Carlos Henrique Marchi

Universidade Federal do Paraná (UFPR)

Setor de Tecnologia (TC)

Departamento de Engenharia Mecânica (DEMEC)

Curitiba, 22 de março de 2007.

1 INTRODUÇÃO

Este relatório descreve onze testes estáticos realizados em 5 de outubro de 2006, na Universidade Federal do Paraná, com motores-foguete de espaçomodelos a propelente sólido. Objetivos dos testes: (1) servir como atividade prática da disciplina “Projeto e lançamento de espaçomodelos”, lecionada no segundo semestre de 2006 no curso de graduação em engenharia mecânica da UFPR; (2) obter curvas de empuxo *versus* tempo e parâmetros de desempenho do motor-foguete do espaçomodelo Sondinha II; e (3) verificar a repetibilidade do desempenho do motor.

2 DESCRIÇÃO DOS MOTORES-FOGUETE

A Figura 1 define os parâmetros que descrevem a geometria dos motores-foguete testados, que são cilíndricos circulares com perfuração central. Na Tabela 1 são apresentados os respectivos valores. Os valores de A são aproximados devido à dificuldade de sua medição. Os valores de C, D, E, F, I, K e L foram obtidos através de um paquímetro com precisão de 0,05 mm. Os valores de B, G, H e J foram calculados com base nas relações geométricas dos parâmetros anteriores, conforme mostrado na Figura 1. Os motores SE-4 a SE-15, fabricados pela Saber Eletrônica, foram obtidos em 1990. O propelente dos motores é pólvora negra.

Tabela 1. Parâmetros geométricos dos motores-foguete, em milímetros (mm).

Motor	SE-4	SE-5	SE-6	SE-7	SE-8	SE-9	SE-10	SE-12	SE-13	SE-14	SE-15
A	4,0	4,0	4,0	4,0	4,3	5,0	3,8	4,8	4,7	4,8	4,8
B	4,2	4,2	4,2	4,3	4,3	4,0	4,5	3,8	3,8	4,0	3,9
C	3,5	3,7	3,6	3,1	3,2	3,2	3,4	4,4	3,7	3,7	3,6
D	12,4	12,4	12,4	12,6	12,9	13,0	12,8	12,5	12,3	12,9	12,7
E	19,7	19,7	19,3	19,5	19,3	19,5	19,6	19,4	19,0	20,0	19,3
F	17,1	18,1	18,1	18,6	12,4	12,5	12,2	9,0	8,9	9,0	8,3
G	28,9	24,4	30,7	30,6	31,5	31,6	31,7	32,8	31,9	31,9	31,7
H	16,6	18,1	8,0	8,4	17,2	17,3	17,4	21,6	21,2	22,0	22,1
I	0,5	2,8	6,2	6,0	1,5	1,3	1,2	1,2	3,0	1,6	1,1
J	45,5	42,5	38,7	39,0	48,7	48,9	49,1	54,4	53,1	53,9	53,8
K	63,1	63,4	63,0	63,6	62,6	62,7	62,5	64,6	65,0	64,5	63,2
L	46,0	42,5	48,8	49,2	43,9	44,1	43,9	41,8	40,8	40,9	40,0

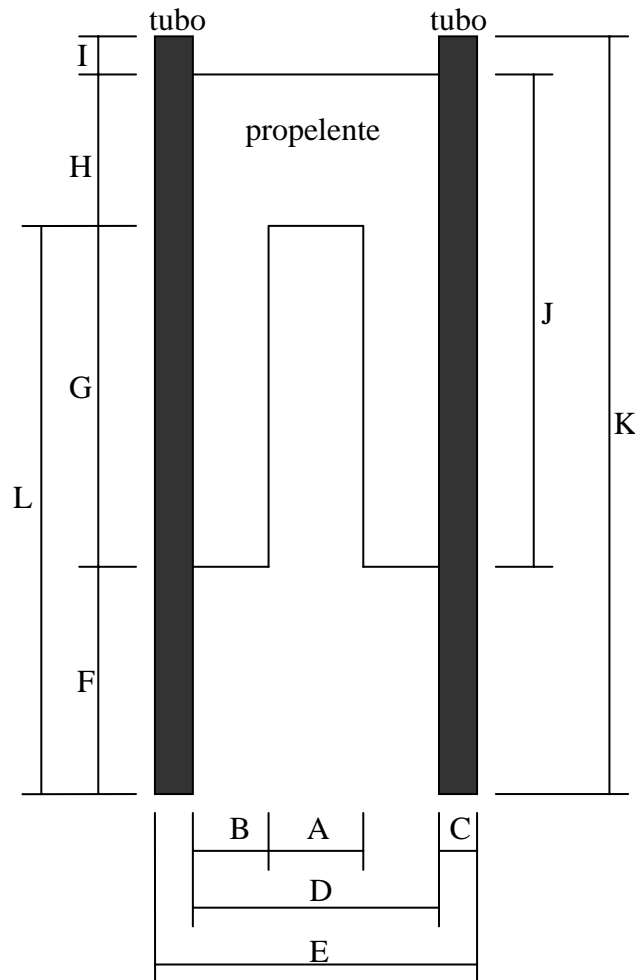


Figura 1. Definição dos parâmetros geométricos dos motores-foguete.

A Figura 2 mostra uma foto dos motores-foguete testados. Nesta figura, os motores estão organizados da seguinte forma: na linha inferior, da esquerda para a direita, os motores SE-4 a SE-7; na linha intermediária, da esquerda para a direita, os motores SE-8 a SE-11; e na linha superior, da esquerda para a direita, os motores SE-12 a SE-15. Cada uma destas três linhas representa um conjunto de quatro motores que têm aproximadamente a mesma massa, crescente da linha inferior para a superior. Pode-se ver nesta foto pontos esbranquiçados, que podem indicar a deterioração superficial da pólvora negra.

A Tabela 2 apresenta os seguintes parâmetros: M_o = massa total do motor antes da queima do propelente; M_f = massa total do motor depois da queima do propelente; M_p = massa de propelente; V = volume do grão-propelente; e ρ = massa específica do propelente. M_o e M_f foram medidos com uma balança cuja precisão é de 2 casas decimais, isto é, 0,01 g; com os motores SE-8 a SE-10 a precisão é de 1 g. Os demais parâmetros foram obtidos através das seguintes equações:

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

$$V = \frac{\pi}{4}D^2H + \frac{\pi}{4}(D^2 - A^2)G \quad (2)$$

$$\rho = \frac{Mp}{V} \quad (3)$$



Figura 2. Foto mostrando os motores-foguete SE-4 a SE-15.

Tabela 2. Massas dos motores-foguete.

Motor	SE-4	SE-5	SE-6	SE-7	SE-8	SE-9	SE-10	SE-12	SE-13	SE-14	SE-15
Mo (g)	15,29	15,28	14,38	14,20	18	18	18	17,06	16,44	18,52	17,59
Mf (g)	7,71	8,00	7,33	8,05	?	?	?	7,51	6,95	7,79	7,42
Mp (g)	7,58	7,28	7,05	6,15	?	?	?	9,55	9,49	10,73	10,17
V (cm ³)	5,13	4,83	4,29	4,48	5,91	5,87	5,96	6,08	5,76	6,47	6,24
ρ (g/cm ³)	1,48	1,51	1,64	1,37	?	?	?	1,57	1,65	1,66	1,63

Com base nos valores dos motores SE-4 a SE-7 e SE-12 a SE-15, da Tabela 2, e SE-1 e SE-3 da Tabela 2 de Marchi (2006), obtém-se

$$\overline{Mf} = 7,59 \pm 0,73 \text{ g} \quad (4)$$

Este valor médio de Mf foi obtido, portanto, com base em 10 valores. Já a incerteza expandida (U), cujo valor é 0,73 g, foi obtida através do procedimento descrito em ABNT (1997), para fator de abrangência $k = 2,26$, resultante de 9 graus de liberdade e distribuição t para nível de confiança de 95%, conforme recomendação de JHT (1993). O valor de U representa 9,7% de \overline{Mf} .

Os dados mostrados nas Tabelas 1 e 2 foram obtidos pelos alunos.

3 DESCRIÇÃO DOS TESTES ESTÁTICOS

Os testes estáticos foram realizados no dia 5 de outubro de 2006, entre 9:30 e 10:45 h, no Laboratório de Máquinas Hidráulicas do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Paraná, em Curitiba, PR.

Foram empregados ignitores que acompanham o kit do espaçomodelo Sonda II, da Bandeirante. O sistema de ignição usado foi o Quest, que usa bateria de 9 V e cujo condutor elétrico tem cerca de 5 m de comprimento. O sistema de aquisição de dados utilizado foi o Spider 8 da HBM, com software Catman 4.5. A célula de carga empregada foi do tipo S2, de 50 N, da HBM, cuja precisão é de 0,025 N.

Durante cada teste estático, obteve-se a força de empuxo do motor durante o tempo de queima do propelente, com frequência de 400 Hz; portanto a precisão no tempo é de 0,0025 s. Os motores-foguete ficaram com seu eixo longitudinal na posição horizontal durante a queima. Fotos mostrando o banco estático e a disposição dos motores podem ser vistas no relatório dos testes de 11 de setembro (Marchi, 2006).

4 RESULTADOS

As Figuras 3 a 13 apresentam as curvas de empuxo *versus* tempo dos motores-foguete após o processamento dos resultados originais, obtidos pelo sistema de aquisição de dados. O início e fim da curva são definidos com o empuxo alcançando 10% do empuxo máximo, conforme Brown (1996).

Na Tabela 3 são apresentados os principais resultados, obtidos com o aplicativo computacional Curva_Empuxo 1.0, de 24 Out 2006, cuja listagem encontra-se no Apêndice deste relatório. Este aplicativo também foi usado na obtenção das curvas mostradas nas Figuras 3 a 13 cujos pontos são apresentados nas Tabelas 4 a 6.

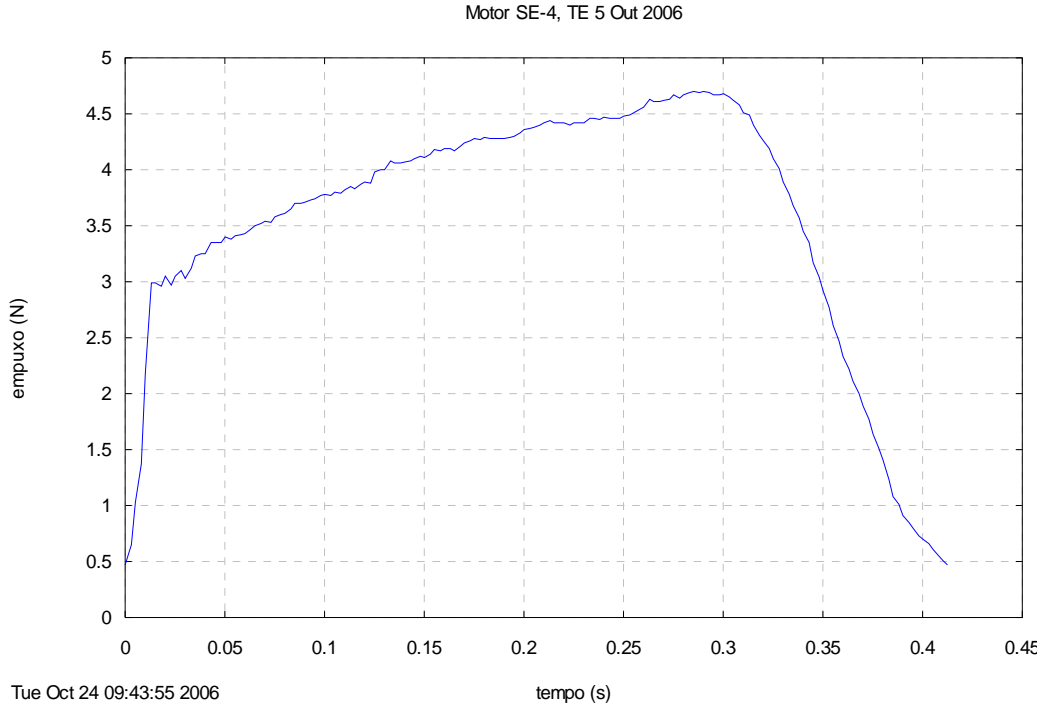


Figura 3. Curva empuxo *versus* tempo processada do motor-foguete SE-4.

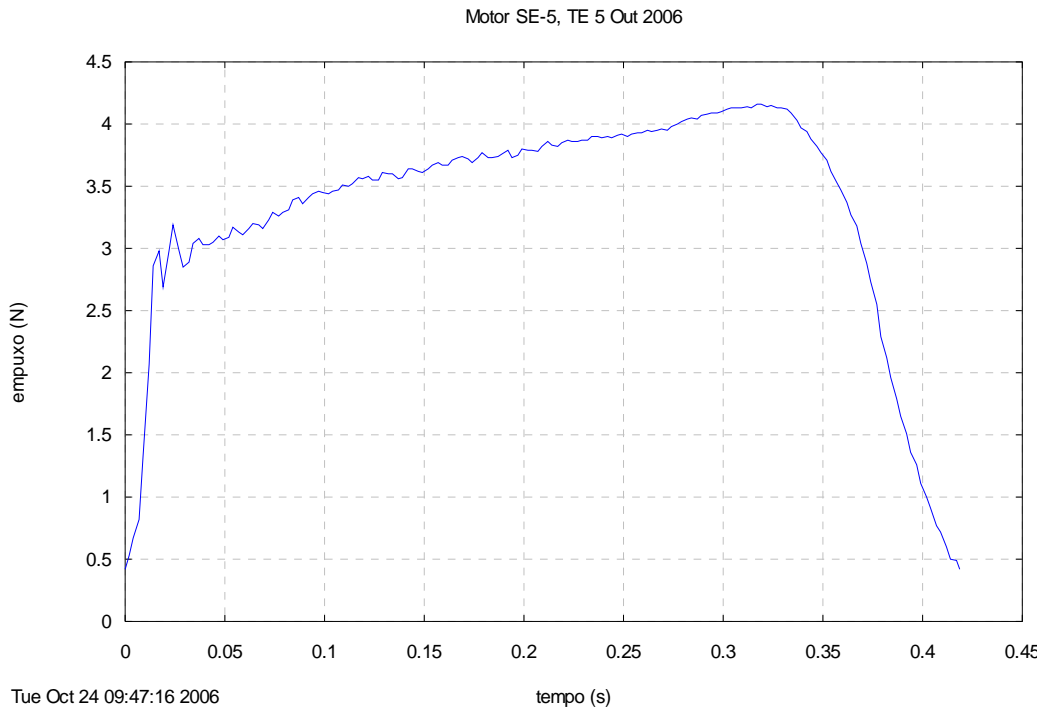


Figura 4. Curva empuxo *versus* tempo processada do motor-foguete SE-5.

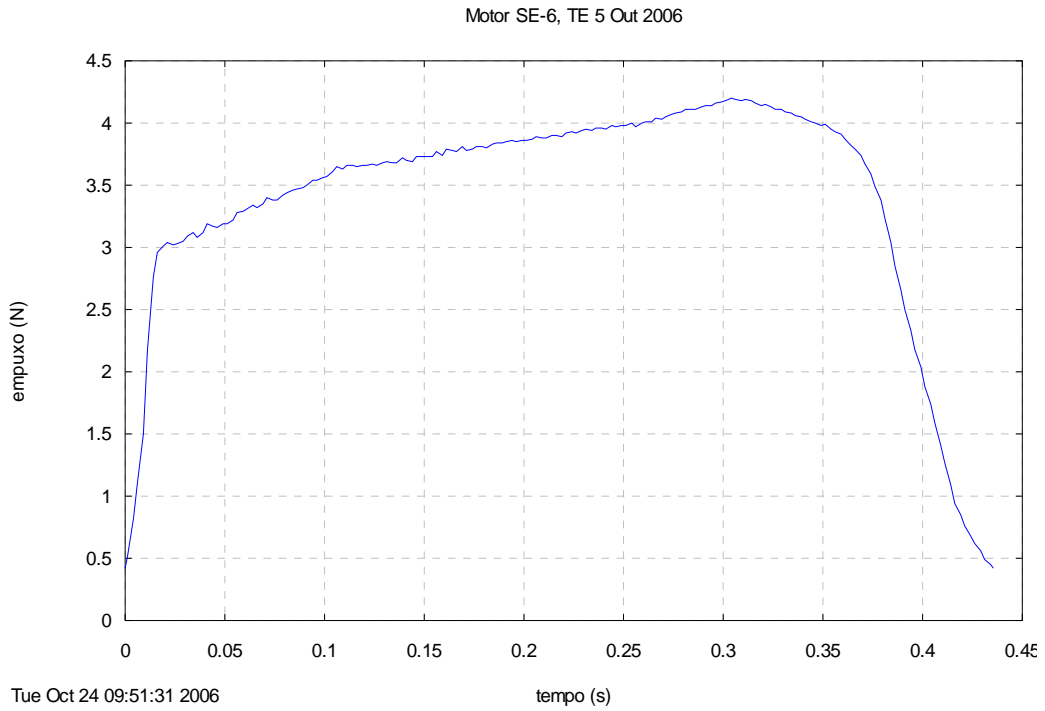


Figura 5. Curva empuxo *versus* tempo processada do motor-foguete SE-6.

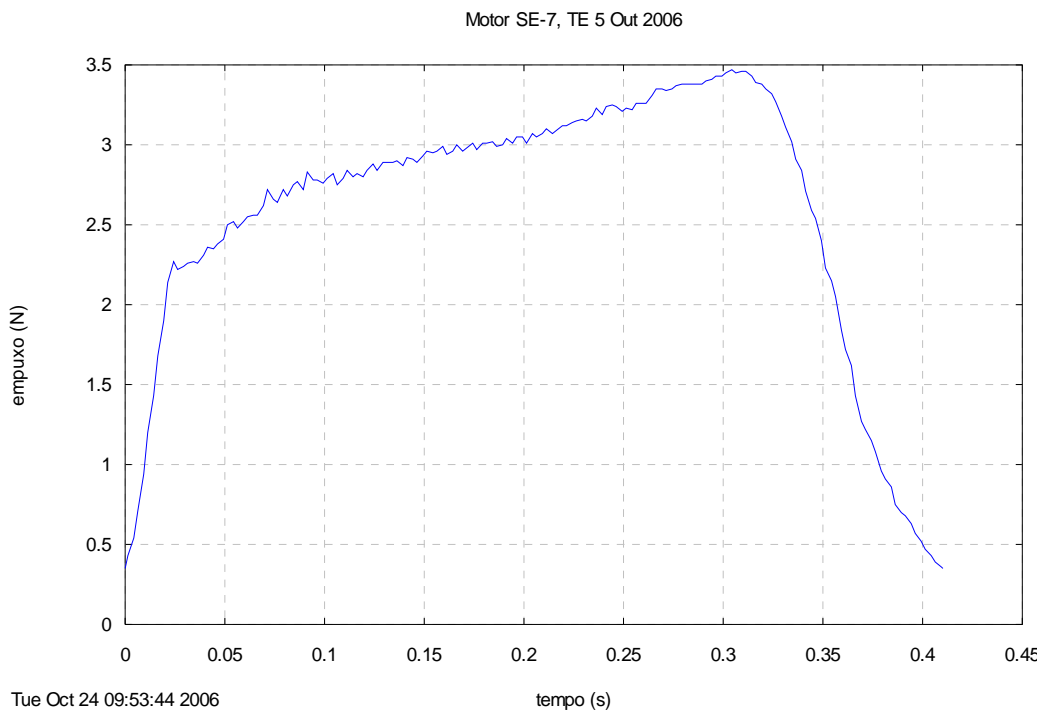


Figura 6. Curva empuxo *versus* tempo processada do motor-foguete SE-7.

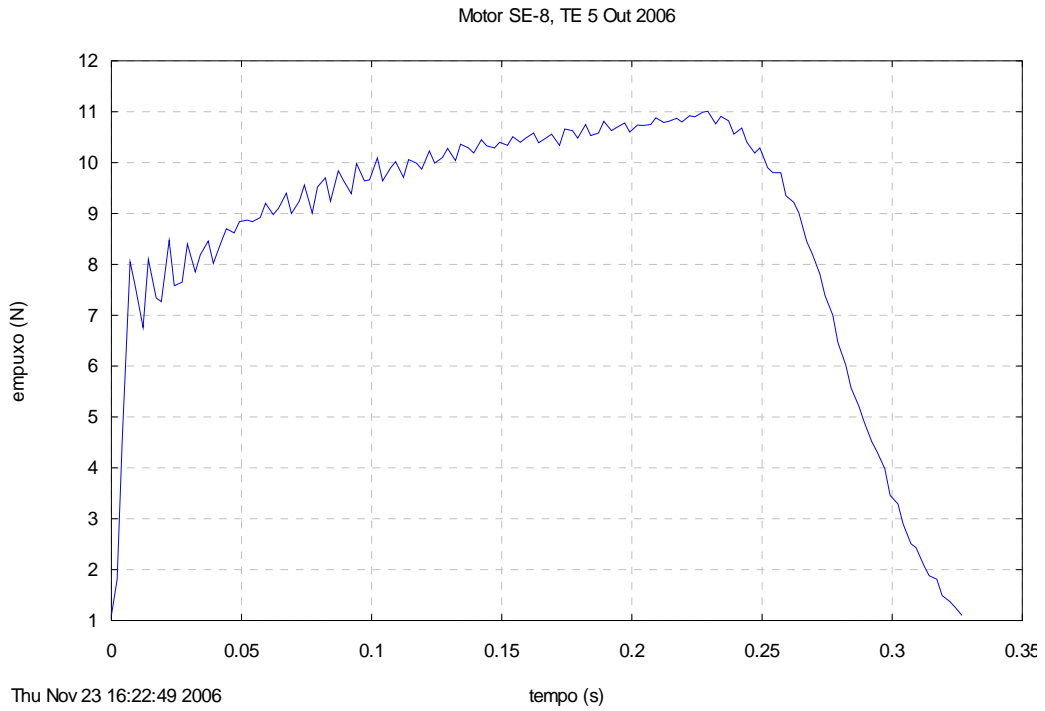


Figura 7. Curva empuxo *versus* tempo processada do motor-foguete SE-8.

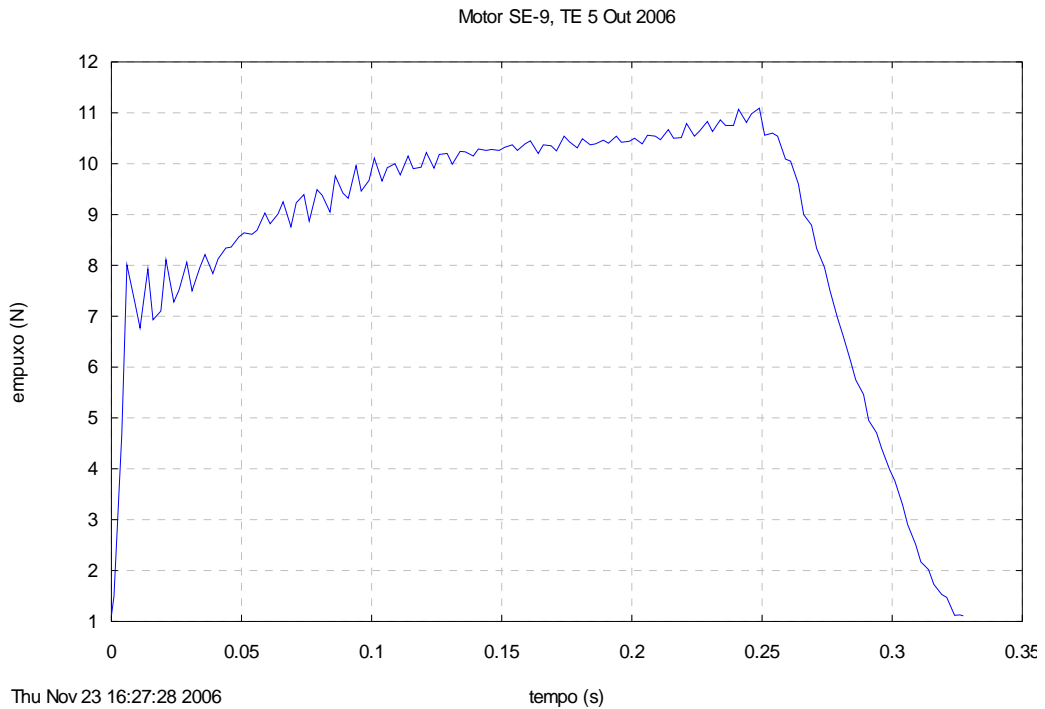


Figura 8. Curva empuxo *versus* tempo processada do motor-foguete SE-9.

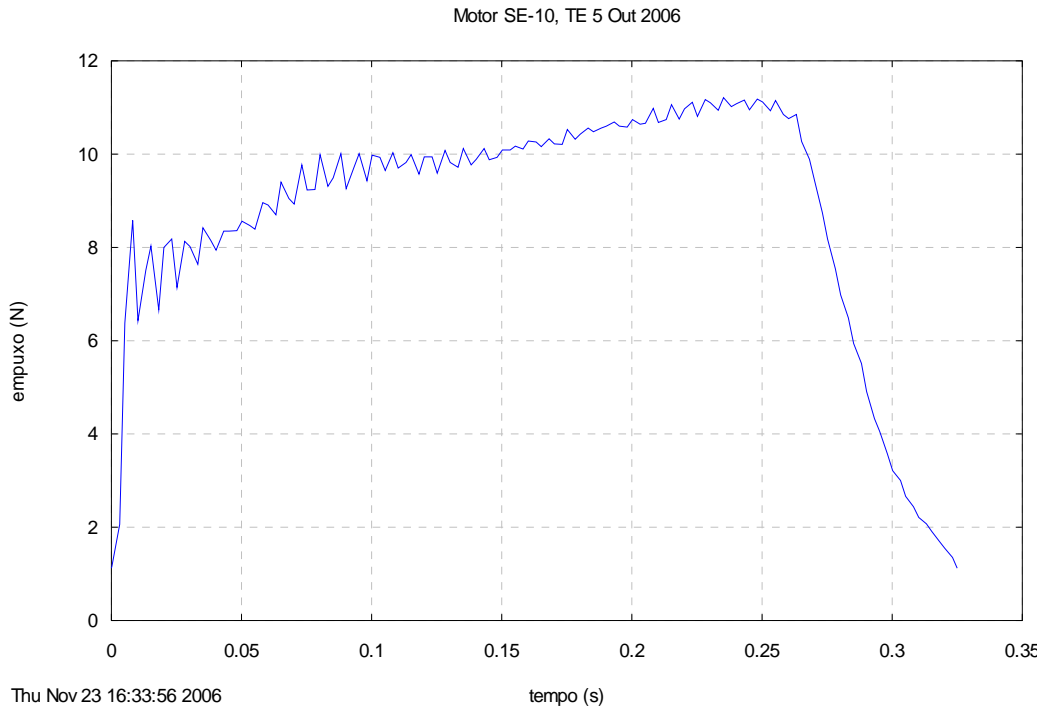


Figura 9. Curva empuxo *versus* tempo processada do motor-foguete SE-10.

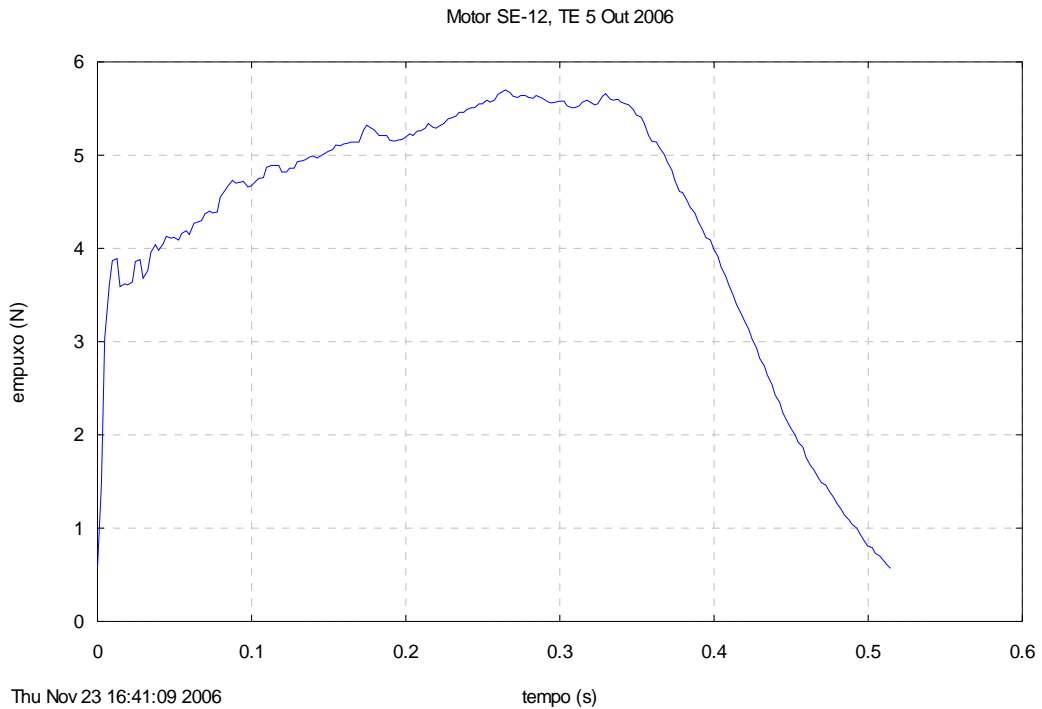


Figura 10. Curva empuxo *versus* tempo processada do motor-foguete SE-12.

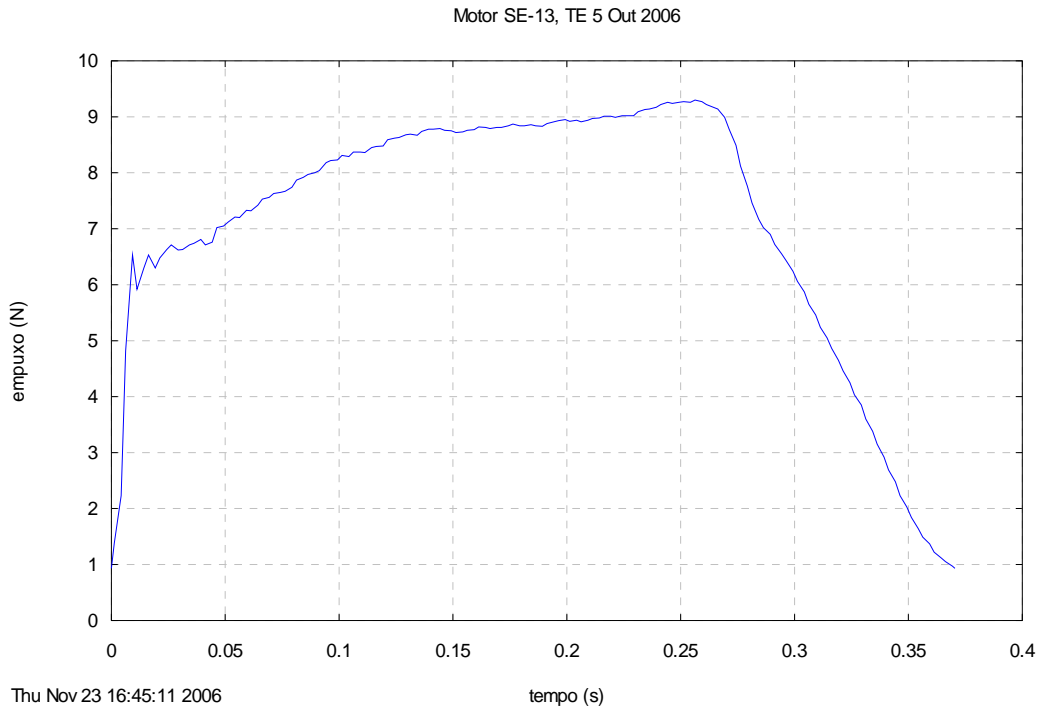


Figura 11. Curva empuxo *versus* tempo processada do motor-foguete SE-13.

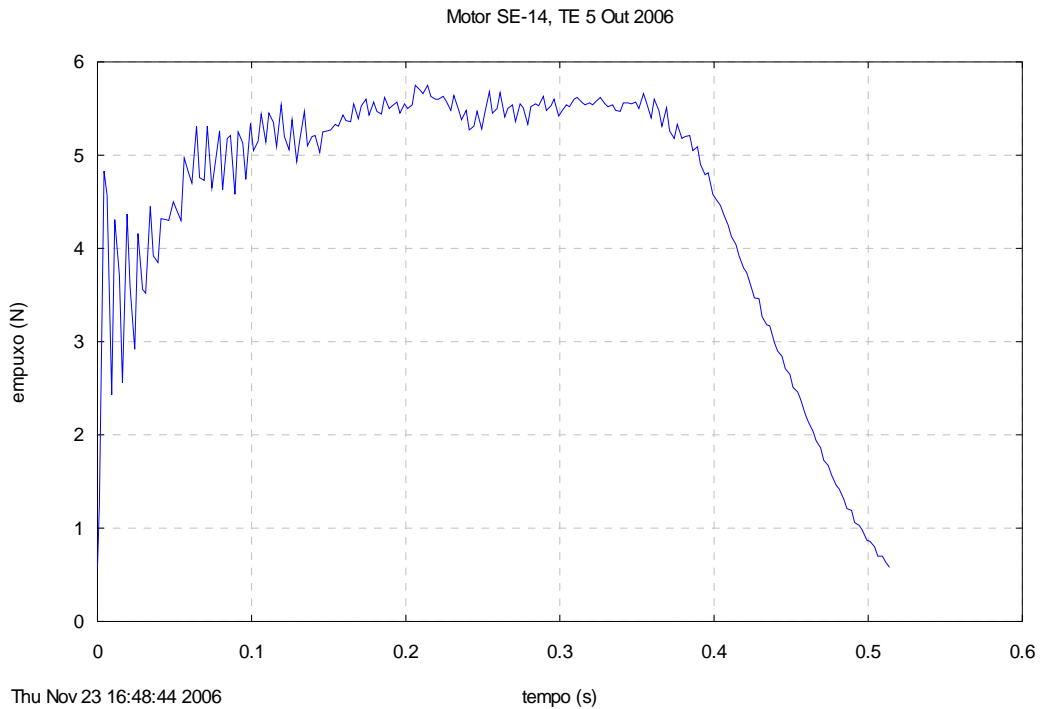


Figura 12. Curva empuxo *versus* tempo processada do motor-foguete SE-14.

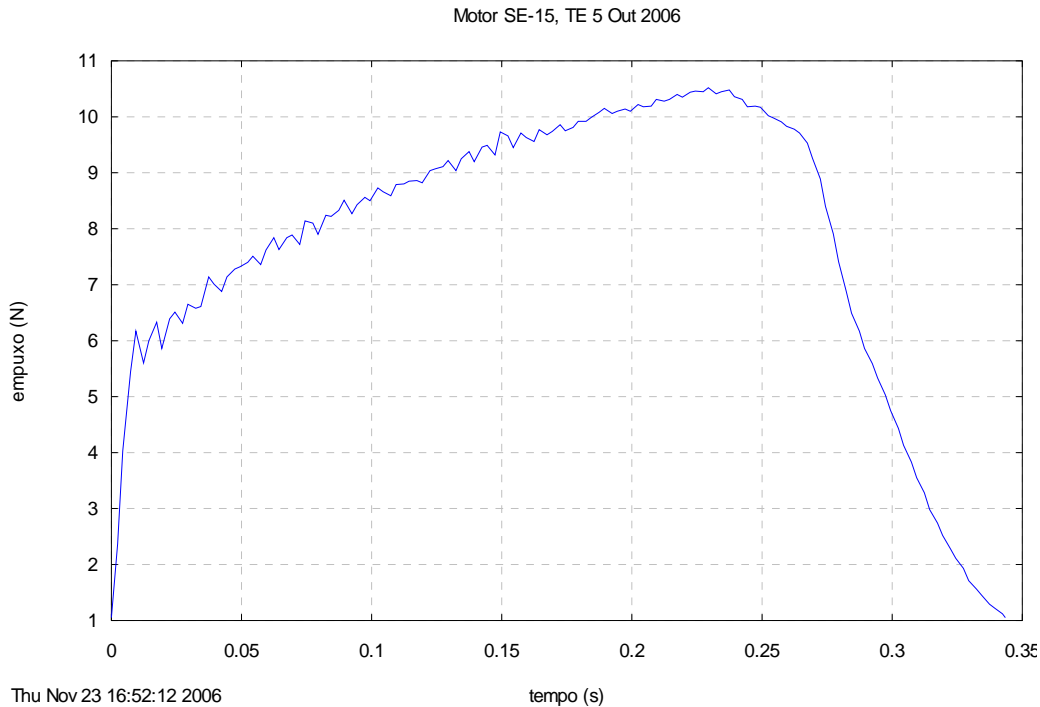


Figura 13. Curva empuxo versus tempo processada do motor-foguete SE-15.

Tabela 3. Resultados dos motores-foguete.

Motor	SE-4	SE-5	SE-6	SE-7	SE-8	SE-9	SE-10	SE-12	SE-13	SE-14	SE-15
tq (s)	0,412	0,419	0,436	0,410	0,327	0,327	0,325	0,515	0,370	0,514	0,343
E _{max} (N)	4,70	4,16	4,20	3,47	11,01	11,09	11,21	5,70	9,30	5,75	10,52
E _{med} (N)	3,55	3,31	3,40	2,59	8,62	8,61	8,73	4,27	7,14	4,53	7,77
E _{max} / E _{med}	1,32	1,26	1,24	1,34	1,28	1,29	1,28	1,33	1,30	1,27	1,35
f _m (g/s)	18,4	17,4	16,2	15,0	?	?	?	18,6	25,6	20,9	29,6
c (m/s)	193	191	210	173	?	?	?	230	278	217	262
I _s (s)	19,7	19,5	21,4	17,6	?	?	?	23,5	28,5	22,2	26,8
I _t (Ns)	1,47	1,39	1,48	1,06	2,82	2,82	2,84	2,20	2,64	2,33	2,67
classe	A4	A3	A3	1/2A3	B9	B9	B9	A4	B7	A5	B8

O significado dos símbolos da Tabela 3 é o seguinte: tq = tempo de queima; E_{max} = empuxo máximo; E_{med} = empuxo médio; f_m = fluxo de massa do propelente; c = velocidade de ejeção efetiva média dos gases; I_s = impulso específico médio; I_t = impulso total; e classe = classificação do motor, conforme NAR (2004). Os valores de tq e E_{max} foram obtidos diretamente de cada curva empuxo versus tempo processada. Os demais parâmetros foram obtidos por meio das seguintes equações:

$$I_t = \int_0^{t_q} E dt \quad (5)$$

$$fm = \frac{Mp}{tq} \quad (6)$$

$$c = \frac{It}{Mp} \quad (7)$$

$$Is = \frac{c}{g} \quad (8)$$

$$Emed = \frac{It}{tq} \quad (9)$$

Na Eq. (5), 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). Na Eq. (8), g é a aceleração local da gravidade; o valor usado foi $9,7876 \text{ m/s}^2$. Os motores testados se enquadram em três classes, conforme o intervalo de impulso total: 1/2A = 0,626 a 1,25 Ns; A = 1,26 a 2,5 Ns; e B = 2,51 a 5,0 Ns. O segundo número da classe representa o empuxo médio arredondado para um número inteiro.

Tabela 4. Dados processados de tempo (s) versus empuxo (N) dos motores-foguete SE-4 a SE-7.

ponto	SE-4		SE-5		SE-6		SE-7	
1	0.0000	0.47	0.0000	0.42	0.0000	0.42	0.0000	0.35
2	0.0001	0.48	0.0020	0.53	0.0011	0.51	0.0013	0.43
3	0.0031	0.65	0.0040	0.67	0.0041	0.82	0.0043	0.54
4	0.0051	1.03	0.0070	0.82	0.0061	1.10	0.0063	0.71
5	0.0081	1.37	0.0090	1.33	0.0091	1.50	0.0093	0.94
6	0.0101	2.18	0.0120	2.07	0.0111	2.17	0.0113	1.20
7	0.0131	2.99	0.0140	2.86	0.0141	2.76	0.0143	1.43
8	0.0151	2.99	0.0170	2.98	0.0161	2.96	0.0163	1.68
9	0.0181	2.96	0.0190	2.69	0.0191	3.01	0.0193	1.90
10	0.0201	3.05	0.0220	2.98	0.0211	3.04	0.0213	2.14
11	0.0231	2.97	0.0240	3.19	0.0241	3.02	0.0243	2.27
12	0.0251	3.05	0.0270	2.98	0.0261	3.03	0.0263	2.22
13	0.0281	3.10	0.0290	2.85	0.0291	3.05	0.0293	2.24
14	0.0301	3.03	0.0320	2.89	0.0311	3.09	0.0313	2.26
15	0.0331	3.12	0.0340	3.04	0.0341	3.12	0.0343	2.27
16	0.0351	3.23	0.0370	3.08	0.0361	3.08	0.0363	2.26
17	0.0381	3.25	0.0390	3.03	0.0391	3.12	0.0393	2.31
18	0.0401	3.25	0.0420	3.03	0.0411	3.19	0.0413	2.36
19	0.0431	3.35	0.0440	3.05	0.0441	3.17	0.0443	2.35
20	0.0451	3.35	0.0470	3.10	0.0461	3.16	0.0463	2.38
21	0.0481	3.35	0.0490	3.07	0.0491	3.19	0.0493	2.41
22	0.0501	3.40	0.0520	3.09	0.0511	3.19	0.0513	2.50
23	0.0531	3.38	0.0540	3.17	0.0541	3.22	0.0543	2.52
24	0.0551	3.41	0.0570	3.13	0.0561	3.28	0.0563	2.48
25	0.0581	3.42	0.0590	3.11	0.0591	3.29	0.0593	2.52
26	0.0601	3.43	0.0620	3.16	0.0611	3.31	0.0613	2.55
27	0.0631	3.47	0.0640	3.20	0.0641	3.34	0.0643	2.56
28	0.0651	3.50	0.0670	3.19	0.0661	3.32	0.0663	2.56
29	0.0681	3.52	0.0690	3.16	0.0691	3.35	0.0693	2.62
30	0.0701	3.54	0.0720	3.23	0.0711	3.40	0.0713	2.72
31	0.0731	3.53	0.0740	3.29	0.0741	3.38	0.0743	2.66

32	0.0751	3.58	0.0770	3.26	0.0761	3.38	0.0763	2.64
33	0.0781	3.60	0.0790	3.29	0.0791	3.42	0.0793	2.72
34	0.0801	3.61	0.0820	3.31	0.0811	3.44	0.0813	2.68
35	0.0831	3.65	0.0840	3.39	0.0841	3.46	0.0843	2.75
36	0.0851	3.70	0.0870	3.41	0.0861	3.47	0.0863	2.77
37	0.0881	3.70	0.0890	3.36	0.0891	3.48	0.0893	2.72
38	0.0901	3.71	0.0920	3.41	0.0911	3.50	0.0913	2.83
39	0.0931	3.73	0.0940	3.44	0.0941	3.54	0.0943	2.78
40	0.0951	3.74	0.0970	3.46	0.0961	3.54	0.0963	2.78
41	0.0981	3.77	0.0990	3.45	0.0991	3.56	0.0993	2.76
42	0.1001	3.78	0.1020	3.44	0.1011	3.57	0.1013	2.79
43	0.1031	3.77	0.1040	3.46	0.1041	3.61	0.1043	2.82
44	0.1051	3.80	0.1070	3.47	0.1061	3.65	0.1063	2.75
45	0.1081	3.79	0.1090	3.51	0.1091	3.63	0.1093	2.79
46	0.1101	3.82	0.1120	3.50	0.1111	3.66	0.1113	2.84
47	0.1131	3.85	0.1140	3.52	0.1141	3.66	0.1143	2.80
48	0.1151	3.83	0.1170	3.57	0.1161	3.65	0.1163	2.82
49	0.1181	3.87	0.1190	3.56	0.1191	3.66	0.1193	2.80
50	0.1201	3.89	0.1220	3.58	0.1211	3.66	0.1213	2.84
51	0.1231	3.88	0.1240	3.55	0.1241	3.67	0.1243	2.88
52	0.1251	3.98	0.1270	3.55	0.1261	3.66	0.1263	2.84
53	0.1281	4.00	0.1290	3.61	0.1291	3.68	0.1293	2.89
54	0.1301	4.00	0.1320	3.60	0.1311	3.69	0.1313	2.89
55	0.1331	4.08	0.1340	3.60	0.1341	3.68	0.1343	2.89
56	0.1351	4.06	0.1370	3.56	0.1361	3.68	0.1363	2.90
57	0.1381	4.06	0.1390	3.57	0.1391	3.72	0.1393	2.87
58	0.1401	4.07	0.1420	3.64	0.1411	3.70	0.1413	2.92
59	0.1431	4.08	0.1440	3.64	0.1441	3.69	0.1443	2.91
60	0.1451	4.10	0.1470	3.62	0.1461	3.73	0.1463	2.89
61	0.1481	4.12	0.1490	3.61	0.1491	3.73	0.1493	2.93
62	0.1501	4.11	0.1520	3.64	0.1511	3.73	0.1513	2.96
63	0.1531	4.14	0.1540	3.67	0.1541	3.73	0.1543	2.95
64	0.1551	4.18	0.1570	3.69	0.1561	3.77	0.1563	2.96
65	0.1581	4.17	0.1590	3.67	0.1591	3.74	0.1593	2.99
66	0.1601	4.19	0.1620	3.67	0.1611	3.79	0.1613	2.94
67	0.1631	4.19	0.1640	3.71	0.1641	3.78	0.1643	2.96
68	0.1651	4.17	0.1670	3.73	0.1661	3.77	0.1663	3.00
69	0.1681	4.21	0.1690	3.74	0.1691	3.81	0.1693	2.96
70	0.1701	4.24	0.1720	3.72	0.1711	3.78	0.1713	2.98
71	0.1731	4.26	0.1740	3.69	0.1741	3.79	0.1743	3.01
72	0.1751	4.28	0.1770	3.73	0.1761	3.81	0.1763	2.97
73	0.1781	4.27	0.1790	3.77	0.1791	3.81	0.1793	3.01
74	0.1801	4.29	0.1820	3.73	0.1811	3.80	0.1813	3.01
75	0.1831	4.28	0.1840	3.73	0.1841	3.83	0.1843	3.02
76	0.1851	4.28	0.1870	3.74	0.1861	3.84	0.1863	2.99
77	0.1881	4.28	0.1890	3.76	0.1891	3.84	0.1893	3.00
78	0.1901	4.28	0.1920	3.79	0.1911	3.85	0.1913	3.04
79	0.1931	4.29	0.1940	3.73	0.1941	3.86	0.1943	3.01
80	0.1951	4.30	0.1970	3.75	0.1961	3.85	0.1963	3.05
81	0.1981	4.33	0.1990	3.80	0.1991	3.86	0.1993	3.05
82	0.2001	4.36	0.2020	3.79	0.2011	3.86	0.2013	3.01
83	0.2031	4.37	0.2040	3.79	0.2041	3.87	0.2043	3.07
84	0.2051	4.38	0.2070	3.78	0.2061	3.89	0.2063	3.05
85	0.2081	4.40	0.2090	3.82	0.2091	3.88	0.2093	3.07
86	0.2101	4.42	0.2120	3.86	0.2111	3.88	0.2113	3.10
87	0.2131	4.44	0.2140	3.83	0.2141	3.90	0.2143	3.07
88	0.2151	4.42	0.2170	3.82	0.2161	3.90	0.2163	3.09
89	0.2181	4.42	0.2190	3.85	0.2191	3.89	0.2193	3.12
90	0.2201	4.42	0.2220	3.87	0.2211	3.92	0.2213	3.12
91	0.2231	4.40	0.2240	3.86	0.2241	3.93	0.2243	3.14
92	0.2251	4.42	0.2270	3.86	0.2261	3.92	0.2263	3.15
93	0.2281	4.42	0.2290	3.87	0.2291	3.94	0.2293	3.16
94	0.2301	4.42	0.2320	3.87	0.2311	3.95	0.2313	3.15
95	0.2331	4.46	0.2340	3.90	0.2341	3.94	0.2343	3.18
96	0.2351	4.46	0.2370	3.90	0.2361	3.96	0.2363	3.23
97	0.2381	4.45	0.2390	3.89	0.2391	3.96	0.2393	3.19
98	0.2401	4.47	0.2420	3.90	0.2411	3.95	0.2413	3.24
99	0.2431	4.46	0.2440	3.89	0.2441	3.98	0.2443	3.25
100	0.2451	4.46	0.2470	3.91	0.2461	3.97	0.2463	3.24
101	0.2481	4.46	0.2490	3.92	0.2491	3.98	0.2493	3.21
102	0.2501	4.48	0.2520	3.90	0.2511	3.98	0.2513	3.23
103	0.2531	4.49	0.2540	3.92	0.2541	4.00	0.2543	3.22
104	0.2551	4.51	0.2570	3.93	0.2561	3.97	0.2563	3.26
105	0.2581	4.54	0.2590	3.93	0.2591	4.00	0.2593	3.26
106	0.2601	4.56	0.2620	3.95	0.2611	4.01	0.2613	3.26
107	0.2631	4.63	0.2640	3.94	0.2641	4.01	0.2643	3.31
108	0.2651	4.61	0.2670	3.95	0.2661	4.04	0.2663	3.35
109	0.2681	4.61	0.2690	3.96	0.2691	4.03	0.2693	3.35
110	0.2701	4.62	0.2720	3.95	0.2711	4.05	0.2713	3.34
111	0.2731	4.63	0.2740	3.98	0.2741	4.07	0.2743	3.35

112	0.2751	4.67	0.2770	4.00	0.2761	4.08	0.2763	3.37
113	0.2781	4.64	0.2790	4.02	0.2791	4.09	0.2793	3.38
114	0.2801	4.67	0.2820	4.04	0.2811	4.11	0.2813	3.38
115	0.2831	4.69	0.2840	4.05	0.2841	4.11	0.2843	3.38
116	0.2851	4.70	0.2870	4.04	0.2861	4.11	0.2863	3.38
117	0.2881	4.69	0.2890	4.07	0.2891	4.13	0.2893	3.38
118	0.2901	4.70	0.2920	4.08	0.2911	4.14	0.2913	3.40
119	0.2931	4.69	0.2940	4.09	0.2941	4.14	0.2943	3.41
120	0.2951	4.67	0.2970	4.09	0.2961	4.16	0.2963	3.43
121	0.2981	4.67	0.2990	4.10	0.2991	4.17	0.2993	3.43
122	0.3001	4.68	0.3020	4.12	0.3011	4.18	0.3013	3.45
123	0.3031	4.65	0.3040	4.13	0.3041	4.20	0.3043	3.47
124	0.3051	4.62	0.3070	4.13	0.3061	4.19	0.3063	3.45
125	0.3081	4.58	0.3090	4.13	0.3091	4.18	0.3093	3.46
126	0.3101	4.51	0.3120	4.14	0.3111	4.19	0.3113	3.46
127	0.3131	4.49	0.3140	4.13	0.3141	4.18	0.3143	3.43
128	0.3151	4.40	0.3170	4.16	0.3161	4.16	0.3163	3.39
129	0.3181	4.31	0.3190	4.16	0.3191	4.14	0.3193	3.38
130	0.3201	4.26	0.3220	4.14	0.3211	4.15	0.3213	3.35
131	0.3231	4.19	0.3240	4.15	0.3241	4.13	0.3243	3.32
132	0.3251	4.10	0.3270	4.13	0.3261	4.11	0.3263	3.27
133	0.3281	4.01	0.3290	4.13	0.3291	4.11	0.3293	3.18
134	0.3301	3.89	0.3320	4.12	0.3311	4.09	0.3313	3.11
135	0.3331	3.78	0.3340	4.09	0.3341	4.08	0.3343	3.02
136	0.3351	3.68	0.3370	4.03	0.3361	4.06	0.3363	2.91
137	0.3381	3.57	0.3390	3.97	0.3391	4.05	0.3393	2.84
138	0.3401	3.45	0.3420	3.94	0.3411	4.03	0.3413	2.71
139	0.3431	3.35	0.3440	3.88	0.3441	4.01	0.3443	2.59
140	0.3451	3.17	0.3470	3.82	0.3461	4.00	0.3463	2.54
141	0.3481	3.04	0.3490	3.77	0.3491	3.98	0.3493	2.40
142	0.3501	2.92	0.3520	3.71	0.3511	3.99	0.3513	2.23
143	0.3531	2.77	0.3540	3.62	0.3541	3.95	0.3543	2.15
144	0.3551	2.61	0.3570	3.53	0.3561	3.93	0.3563	2.05
145	0.3581	2.47	0.3590	3.47	0.3591	3.91	0.3593	1.84
146	0.3601	2.33	0.3620	3.37	0.3611	3.87	0.3613	1.72
147	0.3631	2.22	0.3640	3.27	0.3641	3.82	0.3643	1.62
148	0.3651	2.11	0.3670	3.18	0.3661	3.79	0.3663	1.43
149	0.3681	2.00	0.3690	3.04	0.3691	3.74	0.3693	1.27
150	0.3701	1.89	0.3720	2.88	0.3711	3.67	0.3713	1.22
151	0.3731	1.77	0.3740	2.73	0.3741	3.59	0.3743	1.15
152	0.3751	1.64	0.3770	2.55	0.3761	3.49	0.3763	1.08
153	0.3781	1.51	0.3790	2.29	0.3791	3.38	0.3793	0.96
154	0.3801	1.41	0.3820	2.12	0.3811	3.23	0.3813	0.91
155	0.3831	1.23	0.3840	1.96	0.3841	3.04	0.3843	0.86
156	0.3851	1.08	0.3870	1.79	0.3861	2.85	0.3863	0.75
157	0.3881	1.01	0.3890	1.65	0.3891	2.66	0.3893	0.70
158	0.3901	0.91	0.3920	1.51	0.3911	2.50	0.3913	0.68
159	0.3931	0.85	0.3940	1.36	0.3941	2.33	0.3943	0.63
160	0.3951	0.80	0.3970	1.26	0.3961	2.18	0.3963	0.57
161	0.3981	0.73	0.3990	1.11	0.3991	2.04	0.3993	0.52
162	0.4001	0.70	0.4020	1.00	0.4011	1.88	0.4013	0.47
163	0.4031	0.66	0.4040	0.91	0.4041	1.74	0.4043	0.43
164	0.4051	0.61	0.4070	0.77	0.4061	1.59	0.4063	0.39
165	0.4081	0.55	0.4090	0.72	0.4091	1.41	0.4093	0.36
166	0.4101	0.51	0.4120	0.60	0.4111	1.27	0.4102	0.35
167	0.4124	0.47	0.4140	0.50	0.4141	1.09		
168			0.4170	0.49	0.4161	0.94		
169			0.4186	0.42	0.4191	0.85		
170					0.4211	0.76		
171					0.4241	0.68		
172					0.4261	0.62		
173					0.4291	0.56		
174					0.4311	0.49		
175					0.4341	0.45		
176					0.4355	0.42		

Tabela 5. Dados processados de tempo (s) versus empuxo (N) dos motores-foguete SE-8 a SE-10.

ponto	SE-8		SE-9		SE-10	
1	0.0000	1.10	0.0000	1.11	0.0000	1.12
2	0.0022	1.81	0.0010	1.49	0.0002	1.16
3	0.0042	4.57	0.0040	4.68	0.0032	2.06
4	0.0072	8.05	0.0060	8.01	0.0052	6.38
5	0.0092	7.57	0.0090	7.28	0.0082	8.58
6	0.0122	6.76	0.0110	6.77	0.0102	6.43
7	0.0142	8.10	0.0140	7.93	0.0132	7.51
8	0.0172	7.34	0.0160	6.93	0.0152	8.03
9	0.0192	7.27	0.0190	7.10	0.0182	6.66

10	0.0222	8.47	0.0210	8.11	0.0202	8.00
11	0.0242	7.58	0.0240	7.28	0.0232	8.18
12	0.0272	7.65	0.0260	7.52	0.0252	7.14
13	0.0292	8.40	0.0290	8.06	0.0282	8.13
14	0.0322	7.85	0.0310	7.50	0.0302	8.02
15	0.0342	8.19	0.0340	7.96	0.0332	7.64
16	0.0372	8.46	0.0360	8.21	0.0352	8.42
17	0.0392	8.02	0.0390	7.84	0.0382	8.15
18	0.0422	8.44	0.0410	8.13	0.0402	7.94
19	0.0442	8.70	0.0440	8.34	0.0432	8.35
20	0.0472	8.62	0.0460	8.36	0.0452	8.35
21	0.0492	8.84	0.0490	8.56	0.0482	8.36
22	0.0522	8.87	0.0510	8.64	0.0502	8.56
23	0.0542	8.84	0.0540	8.61	0.0532	8.47
24	0.0572	8.92	0.0560	8.69	0.0552	8.39
25	0.0592	9.20	0.0590	9.03	0.0582	8.96
26	0.0622	8.98	0.0610	8.82	0.0602	8.91
27	0.0642	9.10	0.0640	9.01	0.0632	8.70
28	0.0672	9.40	0.0660	9.25	0.0652	9.40
29	0.0692	9.00	0.0690	8.76	0.0682	9.05
30	0.0722	9.24	0.0710	9.23	0.0702	8.93
31	0.0742	9.56	0.0740	9.39	0.0732	9.77
32	0.0772	9.01	0.0760	8.87	0.0752	9.23
33	0.0792	9.52	0.0790	9.49	0.0782	9.24
34	0.0822	9.70	0.0810	9.38	0.0802	9.99
35	0.0842	9.24	0.0840	9.05	0.0832	9.31
36	0.0872	9.84	0.0860	9.76	0.0852	9.49
37	0.0892	9.65	0.0890	9.42	0.0882	10.01
38	0.0922	9.39	0.0910	9.32	0.0902	9.26
39	0.0942	9.98	0.0940	9.96	0.0932	9.72
40	0.0972	9.64	0.0960	9.46	0.0952	10.01
41	0.0992	9.66	0.0990	9.67	0.0982	9.43
42	0.1022	10.09	0.1010	10.11	0.1002	9.98
43	0.1042	9.64	0.1040	9.66	0.1032	9.93
44	0.1072	9.89	0.1060	9.92	0.1052	9.65
45	0.1092	10.02	0.1090	10.00	0.1082	10.03
46	0.1122	9.71	0.1110	9.78	0.1102	9.70
47	0.1142	10.06	0.1140	10.15	0.1132	9.82
48	0.1172	9.99	0.1160	9.90	0.1152	9.99
49	0.1192	9.87	0.1190	9.93	0.1182	9.57
50	0.1222	10.23	0.1210	10.22	0.1202	9.94
51	0.1242	9.99	0.1240	9.91	0.1232	9.94
52	0.1272	10.10	0.1260	10.18	0.1252	9.59
53	0.1292	10.28	0.1290	10.20	0.1282	10.08
54	0.1322	10.04	0.1310	9.99	0.1302	9.82
55	0.1342	10.36	0.1340	10.24	0.1332	9.72
56	0.1372	10.29	0.1360	10.23	0.1352	10.12
57	0.1392	10.19	0.1390	10.15	0.1382	9.77
58	0.1422	10.45	0.1410	10.29	0.1402	9.89
59	0.1442	10.33	0.1440	10.26	0.1432	10.12
60	0.1472	10.29	0.1460	10.28	0.1452	9.88
61	0.1492	10.40	0.1490	10.26	0.1482	9.93
62	0.1522	10.34	0.1510	10.32	0.1502	10.09
63	0.1542	10.51	0.1540	10.37	0.1532	10.09
64	0.1572	10.40	0.1560	10.26	0.1552	10.17
65	0.1592	10.48	0.1590	10.39	0.1582	10.11
66	0.1622	10.58	0.1610	10.45	0.1602	10.28
67	0.1642	10.39	0.1640	10.20	0.1632	10.26
68	0.1672	10.49	0.1660	10.37	0.1652	10.16
69	0.1692	10.56	0.1690	10.35	0.1682	10.33
70	0.1722	10.34	0.1710	10.25	0.1702	10.22
71	0.1742	10.66	0.1740	10.54	0.1732	10.21
72	0.1772	10.63	0.1760	10.43	0.1752	10.53
73	0.1792	10.48	0.1790	10.31	0.1782	10.32
74	0.1822	10.75	0.1810	10.49	0.1802	10.43
75	0.1842	10.53	0.1840	10.37	0.1832	10.56
76	0.1872	10.58	0.1860	10.39	0.1852	10.48
77	0.1892	10.81	0.1890	10.46	0.1882	10.56
78	0.1922	10.63	0.1910	10.40	0.1902	10.60
79	0.1942	10.69	0.1940	10.54	0.1932	10.69
80	0.1972	10.78	0.1960	10.42	0.1952	10.60
81	0.1992	10.60	0.1990	10.44	0.1982	10.58
82	0.2022	10.74	0.2010	10.50	0.2002	10.74
83	0.2042	10.73	0.2040	10.39	0.2032	10.64
84	0.2072	10.75	0.2060	10.56	0.2052	10.66
85	0.2092	10.88	0.2090	10.54	0.2082	10.98
86	0.2122	10.79	0.2110	10.47	0.2102	10.68
87	0.2142	10.81	0.2140	10.67	0.2132	10.74
88	0.2172	10.87	0.2160	10.50	0.2152	11.06
89	0.2192	10.80	0.2190	10.51	0.2182	10.75

90	0.2222	10.92	0.2210	10.79	0.2202	10.97
91	0.2242	10.90	0.2240	10.54	0.2232	11.11
92	0.2272	10.99	0.2260	10.64	0.2252	10.81
93	0.2292	11.01	0.2290	10.83	0.2282	11.17
94	0.2322	10.76	0.2310	10.63	0.2302	11.10
95	0.2342	10.91	0.2340	10.86	0.2332	10.94
96	0.2372	10.82	0.2360	10.75	0.2352	11.21
97	0.2392	10.56	0.2390	10.75	0.2382	11.02
98	0.2422	10.68	0.2410	11.07	0.2402	11.08
99	0.2442	10.40	0.2440	10.81	0.2432	11.16
100	0.2472	10.19	0.2460	10.98	0.2452	10.95
101	0.2492	10.29	0.2490	11.09	0.2482	11.18
102	0.2522	9.90	0.2510	10.56	0.2502	11.12
103	0.2542	9.80	0.2540	10.60	0.2532	10.93
104	0.2572	9.80	0.2560	10.54	0.2552	11.15
105	0.2592	9.35	0.2590	10.09	0.2582	10.85
106	0.2622	9.22	0.2610	10.05	0.2602	10.76
107	0.2642	9.01	0.2640	9.60	0.2632	10.85
108	0.2672	8.45	0.2660	9.00	0.2652	10.27
109	0.2692	8.22	0.2690	8.79	0.2682	9.89
110	0.2722	7.81	0.2710	8.33	0.2702	9.43
111	0.2742	7.39	0.2740	7.96	0.2732	8.74
112	0.2772	7.00	0.2760	7.52	0.2752	8.18
113	0.2792	6.46	0.2790	6.97	0.2782	7.54
114	0.2822	6.02	0.2810	6.64	0.2802	6.98
115	0.2842	5.57	0.2840	6.13	0.2832	6.49
116	0.2872	5.21	0.2860	5.75	0.2852	5.94
117	0.2892	4.91	0.2890	5.46	0.2882	5.51
118	0.2922	4.51	0.2910	4.95	0.2902	4.91
119	0.2942	4.31	0.2940	4.71	0.2932	4.33
120	0.2972	3.98	0.2960	4.39	0.2952	4.05
121	0.2992	3.46	0.2990	3.99	0.2982	3.57
122	0.3022	3.29	0.3010	3.77	0.3002	3.21
123	0.3042	2.90	0.3040	3.29	0.3032	3.00
124	0.3072	2.51	0.3060	2.90	0.3052	2.66
125	0.3092	2.43	0.3090	2.52	0.3082	2.44
126	0.3122	2.08	0.3110	2.17	0.3102	2.21
127	0.3142	1.88	0.3140	2.02	0.3132	2.07
128	0.3172	1.81	0.3160	1.73	0.3152	1.91
129	0.3192	1.49	0.3190	1.53	0.3182	1.69
130	0.3222	1.37	0.3210	1.47	0.3202	1.55
131	0.3242	1.26	0.3240	1.12	0.3232	1.35
132	0.3268	1.10	0.3260	1.13	0.3250	1.12
133			0.3273	1.11		

Tabela 6. Dados processados de tempo (s) versus empuxo (N) dos motores-foguete SE-12 a SE-15.

ponto	SE-12		SE-13		SE-14		SE-15	
1	0.0000	0.57	0.0000	0.93	0.0000	0.58	0.0000	1.05
2	0.0026	1.49	0.0013	1.38	0.0012	1.26	0.0024	2.37
3	0.0046	3.03	0.0043	2.23	0.0042	4.83	0.0044	4.03
4	0.0076	3.61	0.0063	4.82	0.0062	4.57	0.0074	5.45
5	0.0096	3.87	0.0093	6.53	0.0092	2.43	0.0094	6.17
6	0.0126	3.89	0.0113	5.92	0.0112	4.31	0.0124	5.60
7	0.0146	3.59	0.0143	6.30	0.0142	3.71	0.0144	6.00
8	0.0176	3.62	0.0163	6.53	0.0162	2.56	0.0174	6.33
9	0.0196	3.61	0.0193	6.30	0.0192	4.37	0.0194	5.86
10	0.0226	3.64	0.0213	6.48	0.0212	3.58	0.0224	6.39
11	0.0246	3.86	0.0243	6.63	0.0242	2.92	0.0244	6.51
12	0.0276	3.88	0.0263	6.71	0.0262	4.16	0.0274	6.31
13	0.0296	3.68	0.0293	6.62	0.0292	3.56	0.0294	6.65
14	0.0326	3.76	0.0313	6.63	0.0312	3.52	0.0324	6.58
15	0.0346	3.96	0.0343	6.71	0.0342	4.45	0.0344	6.61
16	0.0376	4.04	0.0363	6.74	0.0362	3.92	0.0374	7.14
17	0.0396	3.98	0.0393	6.81	0.0392	3.85	0.0394	7.01
18	0.0426	4.05	0.0413	6.71	0.0412	4.32	0.0424	6.88
19	0.0446	4.13	0.0443	6.76	0.0442	4.31	0.0444	7.14
20	0.0476	4.11	0.0463	7.02	0.0462	4.30	0.0474	7.28
21	0.0496	4.12	0.0493	7.05	0.0492	4.50	0.0494	7.32
22	0.0526	4.09	0.0513	7.12	0.0512	4.42	0.0524	7.40
23	0.0546	4.16	0.0543	7.21	0.0542	4.30	0.0544	7.51
24	0.0576	4.19	0.0563	7.20	0.0562	4.97	0.0574	7.36
25	0.0596	4.15	0.0593	7.33	0.0592	4.80	0.0594	7.62
26	0.0626	4.27	0.0613	7.32	0.0612	4.70	0.0624	7.84
27	0.0646	4.28	0.0643	7.42	0.0642	5.31	0.0644	7.63
28	0.0676	4.30	0.0663	7.53	0.0662	4.76	0.0674	7.84
29	0.0696	4.37	0.0693	7.56	0.0692	4.73	0.0694	7.89
30	0.0726	4.40	0.0713	7.63	0.0712	5.31	0.0724	7.72

31	0.0746	4.38	0.0743	7.65	0.0742	4.65	0.0744	8.14
32	0.0776	4.39	0.0763	7.67	0.0762	4.89	0.0774	8.10
33	0.0796	4.55	0.0793	7.74	0.0792	5.26	0.0794	7.90
34	0.0826	4.62	0.0813	7.87	0.0812	4.63	0.0824	8.24
35	0.0846	4.67	0.0843	7.92	0.0842	5.18	0.0844	8.22
36	0.0876	4.73	0.0863	7.97	0.0862	5.21	0.0874	8.33
37	0.0896	4.70	0.0893	8.00	0.0892	4.58	0.0894	8.51
38	0.0926	4.71	0.0913	8.04	0.0912	5.25	0.0924	8.27
39	0.0946	4.72	0.0943	8.18	0.0942	5.13	0.0944	8.43
40	0.0976	4.66	0.0963	8.22	0.0962	4.74	0.0974	8.56
41	0.0996	4.67	0.0993	8.23	0.0992	5.34	0.0994	8.50
42	0.1026	4.72	0.1013	8.31	0.1012	5.05	0.1024	8.73
43	0.1046	4.75	0.1043	8.29	0.1042	5.15	0.1044	8.66
44	0.1076	4.76	0.1063	8.37	0.1062	5.44	0.1074	8.59
45	0.1096	4.87	0.1093	8.37	0.1092	5.14	0.1094	8.79
46	0.1126	4.89	0.1113	8.36	0.1112	5.45	0.1124	8.80
47	0.1146	4.89	0.1143	8.45	0.1142	5.35	0.1144	8.85
48	0.1176	4.89	0.1163	8.47	0.1162	5.09	0.1174	8.86
49	0.1196	4.82	0.1193	8.48	0.1192	5.54	0.1194	8.82
50	0.1226	4.82	0.1213	8.59	0.1212	5.20	0.1224	9.04
51	0.1246	4.86	0.1243	8.62	0.1242	5.06	0.1244	9.07
52	0.1276	4.86	0.1263	8.63	0.1262	5.38	0.1274	9.11
53	0.1296	4.93	0.1293	8.68	0.1292	4.93	0.1294	9.22
54	0.1326	4.94	0.1313	8.69	0.1312	5.16	0.1324	9.04
55	0.1346	4.95	0.1343	8.67	0.1342	5.47	0.1344	9.25
56	0.1376	4.98	0.1363	8.74	0.1362	5.10	0.1374	9.38
57	0.1396	4.99	0.1393	8.78	0.1392	5.20	0.1394	9.20
58	0.1426	4.97	0.1413	8.78	0.1412	5.21	0.1424	9.46
59	0.1446	4.99	0.1443	8.79	0.1442	5.03	0.1444	9.49
60	0.1476	5.02	0.1463	8.76	0.1462	5.25	0.1474	9.32
61	0.1496	5.04	0.1493	8.75	0.1492	5.26	0.1494	9.73
62	0.1526	5.06	0.1513	8.72	0.1512	5.27	0.1524	9.66
63	0.1546	5.11	0.1543	8.73	0.1542	5.33	0.1544	9.45
64	0.1576	5.10	0.1563	8.76	0.1562	5.31	0.1574	9.71
65	0.1596	5.12	0.1593	8.77	0.1592	5.43	0.1594	9.63
66	0.1626	5.13	0.1613	8.82	0.1612	5.37	0.1624	9.56
67	0.1646	5.14	0.1643	8.81	0.1642	5.36	0.1644	9.77
68	0.1676	5.14	0.1663	8.79	0.1662	5.55	0.1674	9.68
69	0.1696	5.14	0.1693	8.81	0.1692	5.39	0.1694	9.74
70	0.1726	5.27	0.1713	8.81	0.1712	5.53	0.1724	9.86
71	0.1746	5.32	0.1743	8.84	0.1742	5.60	0.1744	9.75
72	0.1776	5.29	0.1763	8.87	0.1762	5.43	0.1774	9.81
73	0.1796	5.27	0.1793	8.84	0.1792	5.57	0.1794	9.92
74	0.1826	5.21	0.1813	8.84	0.1812	5.47	0.1824	9.92
75	0.1846	5.21	0.1843	8.86	0.1842	5.44	0.1844	9.99
76	0.1876	5.21	0.1863	8.84	0.1862	5.62	0.1874	10.08
77	0.1896	5.16	0.1893	8.83	0.1892	5.50	0.1894	10.15
78	0.1926	5.15	0.1913	8.88	0.1912	5.53	0.1924	10.06
79	0.1946	5.16	0.1943	8.91	0.1942	5.57	0.1944	10.10
80	0.1976	5.17	0.1963	8.93	0.1962	5.45	0.1974	10.14
81	0.1996	5.19	0.1993	8.95	0.1992	5.55	0.1994	10.10
82	0.2026	5.23	0.2013	8.92	0.2012	5.50	0.2024	10.22
83	0.2046	5.21	0.2043	8.94	0.2042	5.54	0.2044	10.18
84	0.2076	5.26	0.2063	8.91	0.2062	5.75	0.2074	10.19
85	0.2096	5.26	0.2093	8.94	0.2092	5.70	0.2094	10.31
86	0.2126	5.29	0.2113	8.97	0.2112	5.66	0.2124	10.28
87	0.2146	5.34	0.2143	8.98	0.2142	5.75	0.2144	10.31
88	0.2176	5.30	0.2163	9.01	0.2162	5.63	0.2174	10.40
89	0.2196	5.29	0.2193	9.01	0.2192	5.60	0.2194	10.35
90	0.2226	5.32	0.2213	8.99	0.2212	5.60	0.2224	10.44
91	0.2246	5.34	0.2243	9.02	0.2242	5.63	0.2244	10.46
92	0.2276	5.39	0.2263	9.02	0.2262	5.58	0.2274	10.45
93	0.2296	5.40	0.2293	9.02	0.2292	5.48	0.2294	10.52
94	0.2326	5.42	0.2313	9.09	0.2312	5.64	0.2324	10.41
95	0.2346	5.46	0.2343	9.13	0.2342	5.49	0.2344	10.45
96	0.2376	5.46	0.2363	9.14	0.2362	5.38	0.2374	10.48
97	0.2396	5.49	0.2393	9.17	0.2392	5.48	0.2394	10.36
98	0.2426	5.51	0.2413	9.22	0.2412	5.27	0.2424	10.31
99	0.2446	5.51	0.2443	9.26	0.2442	5.31	0.2444	10.18
100	0.2476	5.55	0.2463	9.24	0.2462	5.47	0.2474	10.19
101	0.2496	5.55	0.2493	9.26	0.2492	5.28	0.2494	10.17
102	0.2526	5.59	0.2513	9.27	0.2512	5.45	0.2524	10.02
103	0.2546	5.57	0.2543	9.26	0.2542	5.68	0.2544	9.98
104	0.2576	5.59	0.2563	9.30	0.2562	5.45	0.2574	9.91
105	0.2596	5.65	0.2593	9.27	0.2592	5.50	0.2594	9.83
106	0.2626	5.68	0.2613	9.22	0.2612	5.67	0.2624	9.78
107	0.2646	5.70	0.2643	9.17	0.2642	5.41	0.2644	9.71
108	0.2676	5.67	0.2663	9.14	0.2662	5.50	0.2674	9.53
109	0.2696	5.63	0.2693	8.99	0.2692	5.54	0.2694	9.26
110	0.2726	5.62	0.2713	8.78	0.2712	5.36	0.2724	8.89

111	0.2746	5.64	0.2743	8.49	0.2742	5.55	0.2744	8.40
112	0.2776	5.64	0.2763	8.12	0.2762	5.51	0.2774	7.91
113	0.2796	5.62	0.2793	7.76	0.2792	5.33	0.2794	7.41
114	0.2826	5.61	0.2813	7.46	0.2812	5.52	0.2824	6.88
115	0.2846	5.64	0.2843	7.17	0.2842	5.55	0.2844	6.49
116	0.2876	5.62	0.2863	7.02	0.2862	5.53	0.2874	6.17
117	0.2896	5.60	0.2893	6.90	0.2892	5.63	0.2894	5.86
118	0.2926	5.57	0.2913	6.72	0.2912	5.48	0.2924	5.59
119	0.2946	5.56	0.2943	6.55	0.2942	5.53	0.2944	5.33
120	0.2976	5.57	0.2963	6.43	0.2962	5.60	0.2974	5.03
121	0.2996	5.58	0.2993	6.24	0.2992	5.42	0.2994	4.75
122	0.3026	5.58	0.3013	6.06	0.3012	5.47	0.3024	4.43
123	0.3046	5.53	0.3043	5.87	0.3042	5.54	0.3044	4.13
124	0.3076	5.51	0.3063	5.65	0.3062	5.52	0.3074	3.83
125	0.3096	5.51	0.3093	5.46	0.3092	5.60	0.3094	3.55
126	0.3126	5.53	0.3113	5.24	0.3112	5.62	0.3124	3.28
127	0.3146	5.57	0.3143	5.05	0.3142	5.57	0.3144	2.98
128	0.3176	5.59	0.3163	4.86	0.3162	5.54	0.3174	2.74
129	0.3196	5.57	0.3193	4.65	0.3192	5.56	0.3194	2.52
130	0.3226	5.54	0.3213	4.46	0.3212	5.54	0.3224	2.28
131	0.3246	5.55	0.3243	4.25	0.3242	5.59	0.3244	2.11
132	0.3276	5.63	0.3263	4.03	0.3262	5.62	0.3274	1.93
133	0.3296	5.66	0.3293	3.85	0.3292	5.55	0.3294	1.71
134	0.3326	5.60	0.3313	3.60	0.3312	5.52	0.3324	1.56
135	0.3346	5.59	0.3343	3.38	0.3342	5.54	0.3344	1.45
136	0.3376	5.60	0.3363	3.15	0.3362	5.48	0.3374	1.29
137	0.3396	5.57	0.3393	2.92	0.3392	5.47	0.3394	1.22
138	0.3426	5.55	0.3413	2.69	0.3412	5.56	0.3424	1.12
139	0.3446	5.54	0.3443	2.48	0.3442	5.56	0.3435	1.05
140	0.3476	5.49	0.3463	2.23	0.3462	5.55		
141	0.3496	5.43	0.3493	2.03	0.3492	5.57		
142	0.3526	5.41	0.3513	1.84	0.3512	5.50		
143	0.3546	5.35	0.3543	1.64	0.3542	5.66		
144	0.3576	5.21	0.3563	1.49	0.3562	5.56		
145	0.3596	5.15	0.3593	1.37	0.3592	5.40		
146	0.3626	5.14	0.3613	1.22	0.3612	5.60		
147	0.3646	5.08	0.3643	1.12	0.3642	5.48		
148	0.3676	5.01	0.3663	1.05	0.3662	5.31		
149	0.3696	4.93	0.3693	0.97	0.3692	5.51		
150	0.3726	4.84	0.3704	0.93	0.3712	5.26		
151	0.3746	4.73			0.3742	5.18		
152	0.3776	4.61			0.3762	5.33		
153	0.3796	4.60			0.3792	5.18		
154	0.3826	4.51			0.3812	5.20		
155	0.3846	4.44			0.3842	5.21		
156	0.3876	4.38			0.3862	5.05		
157	0.3896	4.29			0.3892	5.09		
158	0.3926	4.20			0.3912	4.90		
159	0.3946	4.12			0.3942	4.79		
160	0.3976	4.09			0.3962	4.81		
161	0.3996	4.00			0.3992	4.58		
162	0.4026	3.91			0.4012	4.53		
163	0.4046	3.80			0.4042	4.46		
164	0.4076	3.70			0.4062	4.37		
165	0.4096	3.61			0.4092	4.25		
166	0.4126	3.49			0.4112	4.13		
167	0.4146	3.40			0.4142	4.04		
168	0.4176	3.30			0.4162	3.92		
169	0.4196	3.23			0.4192	3.79		
170	0.4226	3.13			0.4212	3.74		
171	0.4246	3.03			0.4242	3.58		
172	0.4276	2.93			0.4262	3.47		
173	0.4296	2.82			0.4292	3.46		
174	0.4326	2.74			0.4312	3.27		
175	0.4346	2.64			0.4342	3.18		
176	0.4376	2.54			0.4362	3.17		
177	0.4396	2.43			0.4392	2.99		
178	0.4426	2.35			0.4412	2.90		
179	0.4446	2.24			0.4442	2.84		
180	0.4476	2.14			0.4462	2.71		
181	0.4496	2.08			0.4492	2.65		
182	0.4526	2.00			0.4512	2.51		
183	0.4546	1.92			0.4542	2.46		
184	0.4576	1.87			0.4562	2.38		
185	0.4596	1.76			0.4592	2.22		
186	0.4626	1.67			0.4612	2.14		
187	0.4646	1.63			0.4642	2.04		
188	0.4676	1.54			0.4662	1.94		
189	0.4696	1.49			0.4692	1.86		
190	0.4726	1.46			0.4712	1.73		

191	0.4746	1.40		0.4742	1.67
192	0.4776	1.33		0.4762	1.57
193	0.4796	1.27		0.4792	1.46
194	0.4826	1.20		0.4812	1.42
195	0.4846	1.14		0.4842	1.31
196	0.4876	1.09		0.4862	1.21
197	0.4896	1.04		0.4892	1.19
198	0.4926	1.00		0.4912	1.06
199	0.4946	0.94		0.4942	1.03
200	0.4976	0.86		0.4962	0.98
201	0.4996	0.81		0.4992	0.87
202	0.5026	0.79		0.5012	0.86
203	0.5046	0.73		0.5042	0.80
204	0.5076	0.70		0.5062	0.70
205	0.5096	0.66		0.5092	0.70
206	0.5126	0.60		0.5112	0.64
207	0.5146	0.57		0.5138	0.58
208	0.5146	0.57			

5 DISCUSSÃO

As oscilações nas curvas de empuxo das Figuras 3 a 13 praticamente não foram captadas nos testes de 11 Set 2006. Nestes testes, a frequência de aquisição dos dados era de 200 Hz enquanto que nos novos testes foi de 400 Hz.

A baixa velocidade de ejeção dos gases deve ser devido à falta de tubeira e de fechamento da parte superior dos motores. Isso também explicaria o baixo impulso específico obtido, entre 18 e 29 s, para o propelente usado (pólvora negra). Para este mesmo propelente, os motores com tubeira e fechamento superior, do tipo A2 (Apogee), A3T (Estes), B6 (Estes), C6 (Estes) e E9 (Estes) apresentam impulso específico, respectivamente, de 84, 69, 79, 83 e 79 s. Isto é, o impulso específico dos motores Estes e Apogee é cerca de 2,4 a 2,9 vezes o do motor SE-13, que teve o melhor I_s (29) entre os 11 testados.

A Figura 14 apresenta o resultado experimental do impulso total (I_t) *versus* massa de propelente (M_p) para os 11 motores citados na figura. Com base nestes resultados, foi feito um ajuste linear por mínimos quadrados, que resultou na seguinte expressão:

$$I_t = 0,379 M_p - 1,21 \quad (10)$$

onde M_p é dado em gramas e I_t em N.s. Na Figura 14 mostra-se que todos os 11 resultados experimentais estão dentro de um desvio máximo de $\pm 20\%$.

A partir das Eqs. (7), (8) e (10), pode-se obter

$$c = 379 - \frac{1210}{M_p} \quad (11)$$

$$I_s = 38,7 - \frac{124}{M_p} \quad (12)$$

onde M_p é dado em gramas, a velocidade de ejeção efetiva média dos gases (c) em m/s, e o impulso específico médio (I_s) em s.

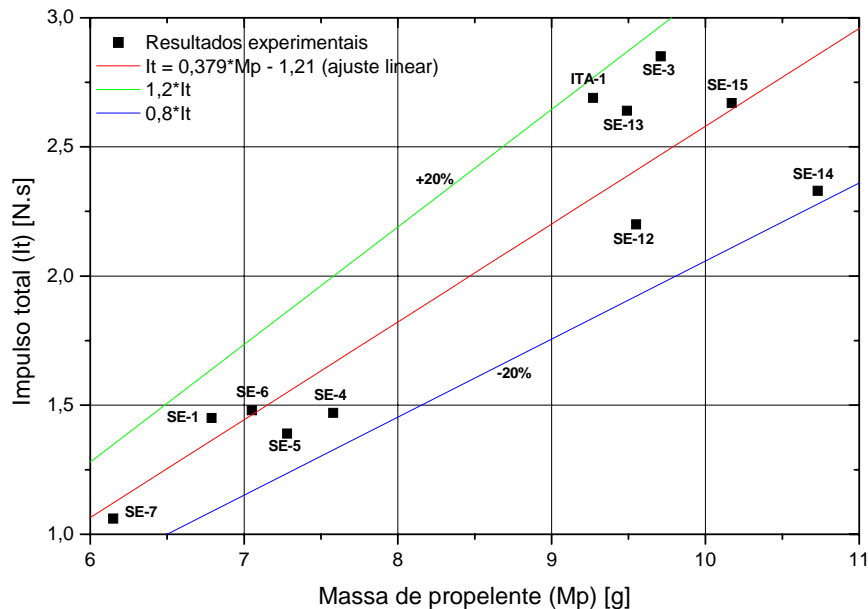


Figura 14. Impulso total *versus* massa de propelente.

6 CONCLUSÃO

Com base em 14 testes estáticos, obteve-se um valor médio para a massa final dos motores-foguete ($\overline{M_f}$), dada pela Eq. (4), com incerteza expandida de 9,7%. Também obteve-se uma correlação empírica, Eq. (10) e Figura 14, que prevê o impulso total (I_t) em função da massa de propelente (M_p), com desvio máximo de $\pm 20\%$. Com base nesta correlação, foram deduzidas matematicamente expressões para a velocidade de ejeção efetiva média dos gases (c) e o impulso específico médio (I_s) em função de M_p , Eqs. (11) e (12).

Recomenda-se usar a incerteza de $\pm 20\%$ do I_t para fazer previsões de trajetória. Nesse sentido, com a massa total (M_o) do motor antes da queima e $\overline{M_f}$ da Eq. (4), M_p pode ser obtido da Eq. (1).

Recomenda-se realizar novos testes estáticos, principalmente com M_p entre 8 e 9 g, para melhorar a correlação da Eq. (10) e diminuir a sua incerteza.

Seria importante desenvolver um modelo teórico para comparar com a Eq. (10).

7 AGRADECIMENTOS

Aos alunos da disciplina “Projeto e lançamento de espaçomodelos”, lecionada no segundo semestre de 2006 no curso de graduação em engenharia mecânica da Universidade Federal do Paraná, pela obtenção dos dados das Tabelas 1 e 2.

Ao eng. Luciano K. Araki, que auxiliou nos testes, realizando a ignição dos motores. E ao prof. Marcos C. Campos, que auxiliou nos testes, operando e disponibilizando 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. A Basílio Baranoff que forneceu os motores-foguete usados nos testes estáticos.

8 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.

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 motores-foguete a propelente sólido de espaçomodelos de 11 Set 2006**. Curitiba: Universidade Federal do Paraná, 2006. 16 p.

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

APÊNDICE

Listagem do aplicativo CURVA_EMPUXO 1.0, de 24 Out 2006

```

Program curva_empuxo_lp0

! Carlos H. Marchi
! DEMEC/UFPR, Curitiba, PR
! versão 1.0: 11 Set 06
! última alteração: 24 Out 06

USE PORTLIB

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 :: nome1, nome2, nome3
character*70 :: dos, titulo

! leitura dos dados principais

ver = system("Notepad curva_empuxo_lp0.ent")

open(8,file="curva_empuxo_lp0.ent")

read(8,*) titulo
read(8,*) nome1
read(8,*) fator
read(8,*) M
read(8,*) g
read(8,*) nome2
read(8,*) nome3

fator = fator / 100

close(8)

flag = 0
Emax = 0.0d0

! determinação do empuxo máximo

open(8,file=trim(adjustl(nome1)))

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)

Emin = fator * 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(nome1)))
open(9,file=trim(adjustl(nome2)))
write(9,15) 0.0d0, Emin
15 format ( f7.4, f7.2 )
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
    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
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'
open(10,file=trim(adjustl(nome3)))
write(10,20) trim(adjustl(titulo)), Emax, tmax, tmax-t0, &
  Emin, t0, tf, tq, It, Emed, c, Is, fm, razao, &
  trim(adjustl(classe)), idnint(Emed)
20 format(/, "**** ", a, " ****", &
  //, f7.2, " = empuxo máximo (N)", &
  //, f7.3, " = tempo original do empuxo máximo (s)", &
  //, f6.3, " = tempo corrigido do empuxo máximo (s)", &

```

```

//, f7.2, " = empuxo mínimo (N)", &
//, f7.3, " = tempo original inicial (s)", &
//, f7.3, " = tempo original final (s)", &
//, f6.3, " = tempo de queima (s)", &
//, f7.2, " = impulso total (Ns)", &
//, f7.2, " = empuxo médio (N)", &
//, f7.1, " = velocidade de exaustão efetiva média (m/s)", &
//, f6.1, " = impulso específico médio (s)", &
//, f7.2, " = fluxo de massa médio (g/s)", &
//, f6.2, " = razão empuxo máximo / empuxo médio", &
//, "classificação do motor = ", a, i2 )

close(10)

dos = "Notepad " // trim(adjustl(nome3))
ver = system(dos)

dos = "Notepad " // trim(adjustl(nome2))
ver = system(dos)

open(9,file="curva_empuxo_lp0.gnu")
do i = 1, 6
  read(9,*)
end do
write(9,31) trim(adjustl(titulo))
31 format("set title '", a, "'")
write(9,30) trim(adjustl(nome2))
30 format("plot '", a, "' notitle")

ver = system("Wgnuplot curva_empuxo_lp0.gnu")
end program curva_empuxo_lp0

```