



***Testes estáticos de 2006 a 2008 de motores-foguete  
do tipo SE (Saber Eletrônica) de espaçomodelos***

**Carlos Henrique Marchi**

Universidade Federal do Paraná (UFPR)  
Setor de Tecnologia (TC)  
Departamento de Engenharia Mecânica (DEMEC)

Curitiba, 16 de dezembro de 2008.

## **1 INTRODUÇÃO**

Este relatório descreve 32 testes estáticos realizados entre 11 de setembro de 2006 e 13 de outubro de 2008, na Universidade Federal do Paraná, com motores-foguete de espaçomodelos a propelente sólido do tipo SE (Saber Eletrônica). Objetivos dos testes: (1) servir como atividade prática da disciplina “Projeto e lançamento de espaçomodelos”, lecionada no curso de graduação em engenharia mecânica da UFPR, e de um trabalho de graduação; (2) obter curvas de empuxo *versus* tempo, e parâmetros de desempenho do motor-foguete do espaçomodelo Sondinha II, fabricado pela Saber Eletrônica (SE); 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. Valores destes parâmetros, de diversos motores, podem ser vistos em Marchi (2006, 2007). Em valores aproximados, o diâmetro externo (parâmetro E) dos motores é de 19 a 20 mm, e o comprimento (parâmetro K), de 62 a 65 mm. Os motores fabricados pela Saber Eletrônica foram obtidos em 1990. O propelente dos motores é pólvora negra.

A Figura 2 mostra uma foto de alguns 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 1 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; e  $M_p$  = massa de propelente.  $M_o$  e  $M_f$  foram medidos com uma balança Gehaka AG200, com precisão 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 apenas a diferença entre a massa total do motor-foguete antes e depois da queima.

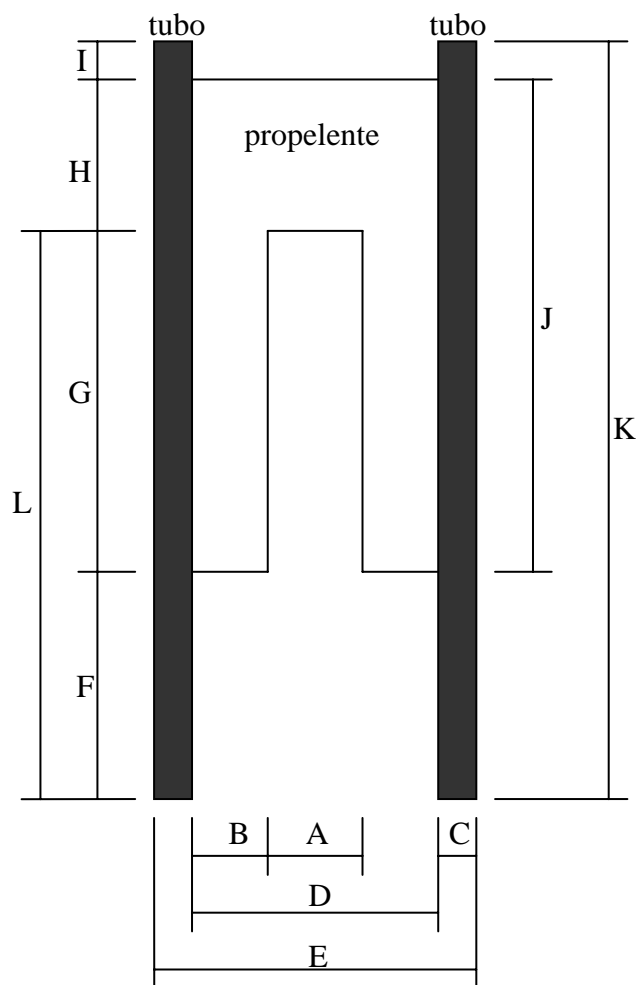


Figura 1. Definição dos parâmetros geométricos dos motores-foguete do tipo SE.

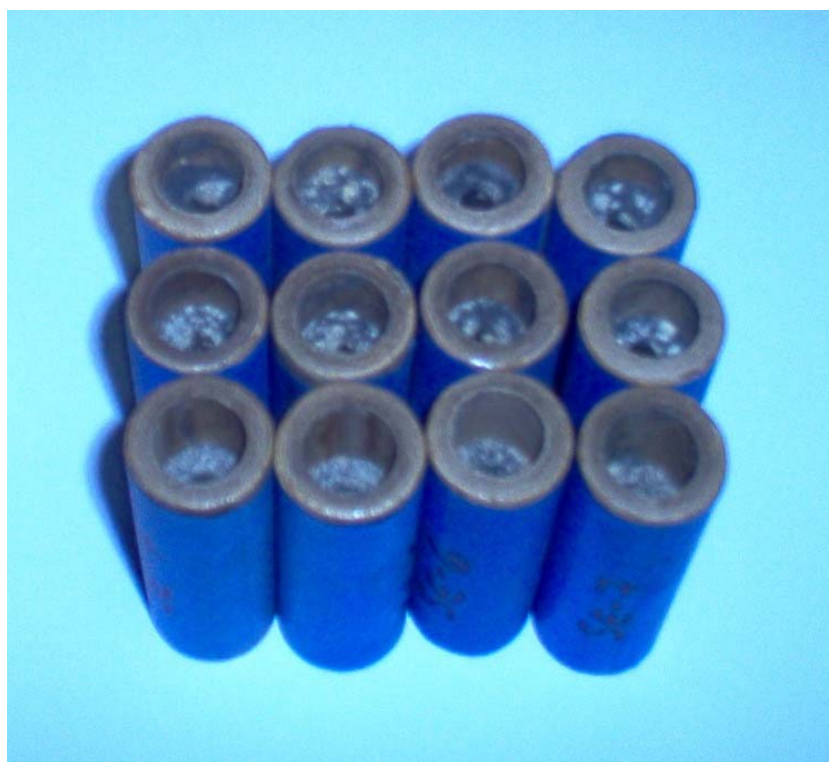


Figura 2. Foto mostrando os motores-foguete SE-4 a SE-15.

**Tabela 1. Massas dos motores-foguete.**

<b>Motor</b>	<b>Mo (g)</b>	<b>Mf (g)</b>	<b>Mp (g)</b>
SE-1	14,40	7,61	6,79
SE-3	17,23	7,52	9,71
SE-4	15,29	7,71	7,58
SE-5	15,28	8,00	7,28
SE-6	14,38	7,33	7,05
SE-7	14,20	8,05	6,15
SE-8	?	?	?
SE-9	?	?	?
SE-10	?	?	?
SE-12	17,06	7,51	9,55
SE-13	16,44	6,95	9,49
SE-14	18,52	7,79	10,73
SE-15	17,59	7,42	10,17
SE-16	14,90	6,16	8,74
SE-17	15,31	7,89	7,42
SE-18	14,00	7,78	6,22
SE-19	17,28	7,63	9,65
SE-20	17,92	7,89	10,03
SE-21	17,50	7,59	9,91
SE-22	17,81	7,84	9,97
SE-23	17,17	7,49	9,68
SE-24	17,72	7,60	10,12
SE-25	18,18	7,28	10,90
SE-26	18,00	7,49	10,51
SE-27	17,97	7,06	10,91
SE-28	17,18	7,48	9,70
SE-29	?	7,68	?
SE-30	17,02	7,63	9,39
SE-31	17,17	7,78	9,39
SE-32	17,14	7,47	9,67
SE-36	15,13	7,96	7,17
SE-53	15,12	7,77	7,35

A partir dos dados de Mf na Tabela 1, obtém-se

$$\overline{Mf} = 7,56 \pm 0,76 \text{ g} \quad (2)$$

Este valor médio de 7,56 g para Mf foi obtido com base em 29 valores. Já a incerteza expandida (U), cujo valor é 0,76 g, foi obtida através do procedimento descrito em ABNT (1997), para fator de abrangência  $k = 2,05$ , resultante de 28 graus de liberdade e distribuição t para nível de confiança de 95%, conforme recomendação de JHT (1993). Portanto, em 19 casos de 20, o valor de Mf deve ficar entre 6,80 e 8,32 g. O valor de U representa 10% de  $\overline{Mf}$ .

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

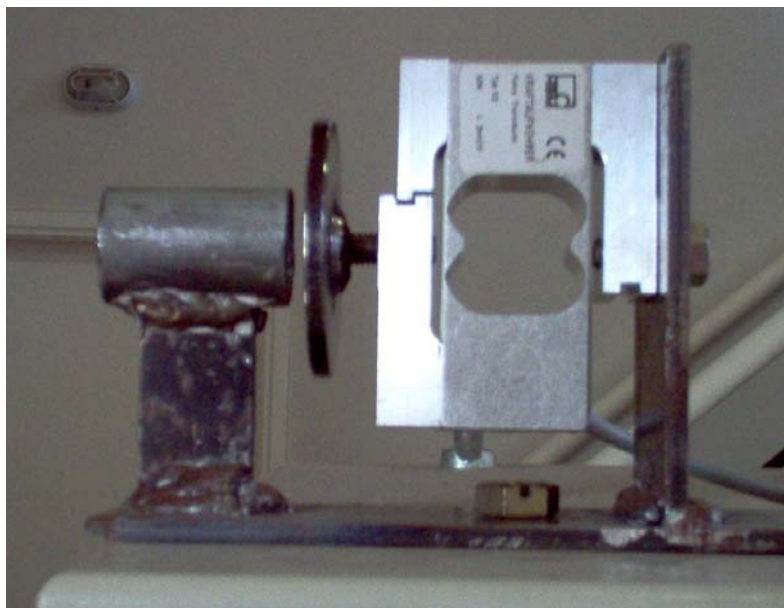
A Tabela 2 apresenta a data dos testes estáticos (TE), a quantidade de testes feitos em cada dia, os motores testados, a frequência de aquisição dos dados e o correspondente intervalo de

tempo. Todos os testes foram realizados no Laboratório de Máquinas Hidráulicas, do Departamento de Engenharia Mecânica, da Universidade Federal do Paraná, em Curitiba, PR.

**Tabela 2. Datas dos testes estáticos.**

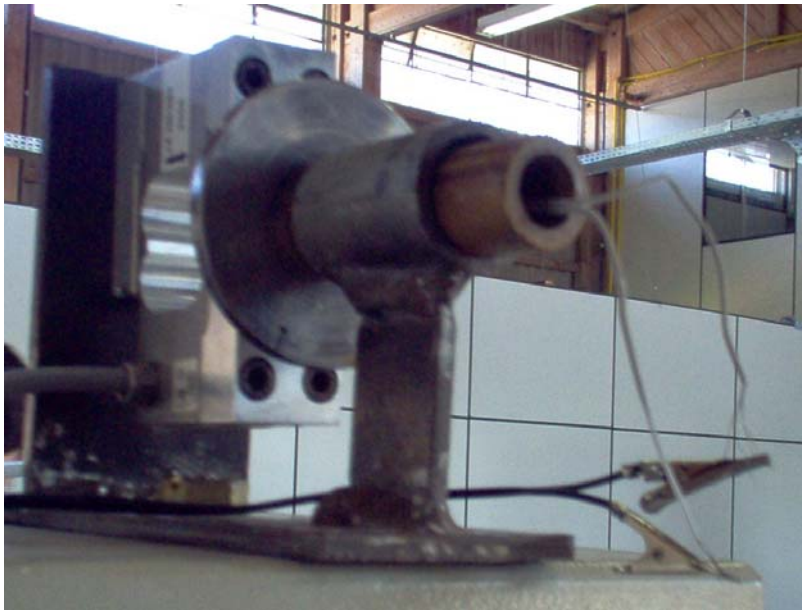
<b>Data</b>	<b>Quantidade</b>	<b>Motores</b>	<b>w (Hz)</b>	<b><math>\Delta t</math> (s)</b>
11 Set 2006	2	SE-1 e SE-3	200	0,0050
5 Out 2006	11	SE-4 a SE-10, e SE-12 a SE-15	400	0,0025
6 Jun 2007	12	SE-16 a SE-27	200	0,0050
5 Mai 2008	5	SE-28 a SE-32	200	0,0050
13 Out 2008	2	SE-36 e SE-53	100	0,0100
Total	32	---	---	---

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 básica é de 0,025 N. A bancada experimental pode ser vista nas Figuras 3 e 4.



**Figura 3. Foto com vista lateral da bancada experimental.**

Durante cada teste estático, obteve-se a força de empuxo do motor durante o tempo de queima do propelente. 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 com o motor SE-1 preparado para o teste estático, já com o ignitor.**

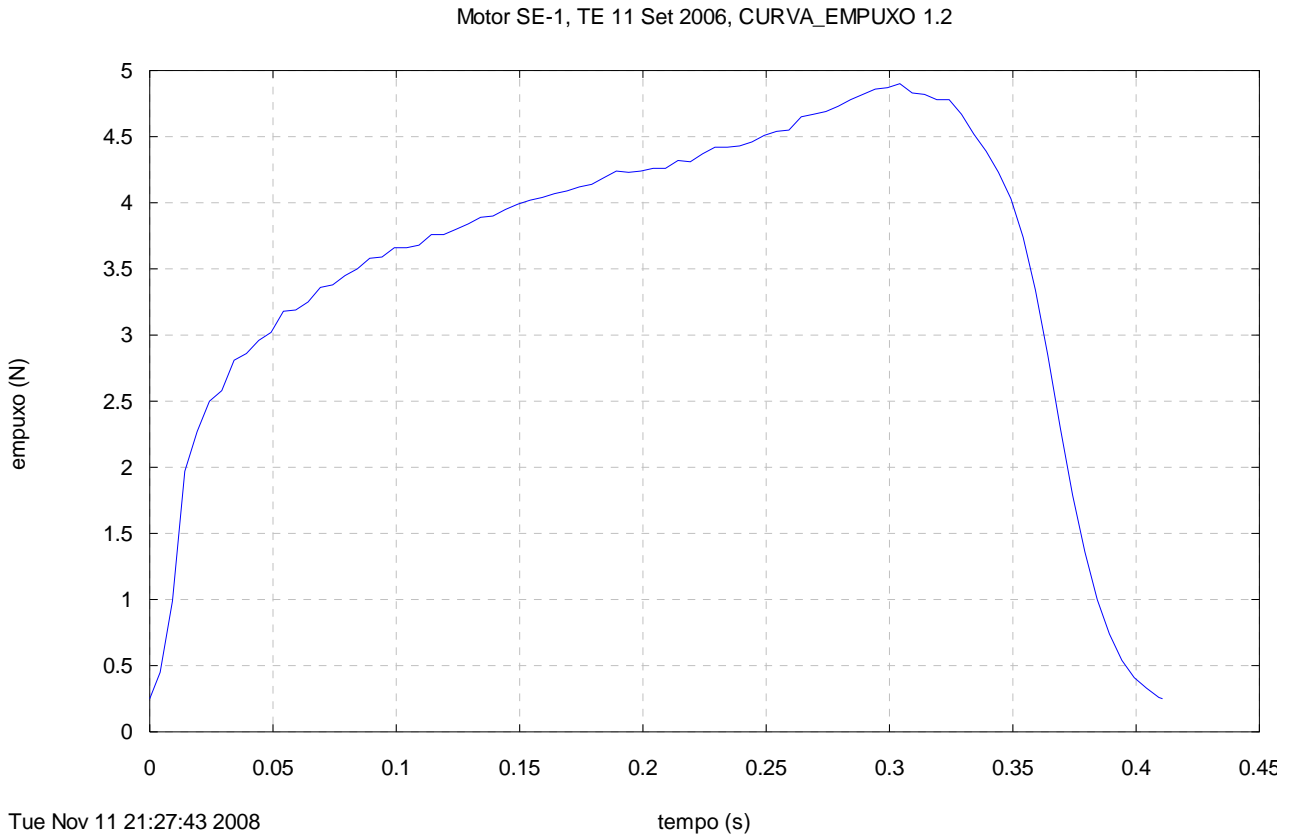
#### **4 RESULTADOS**

A Figura 5 mostra o motor SE-3 durante o seu teste estático.

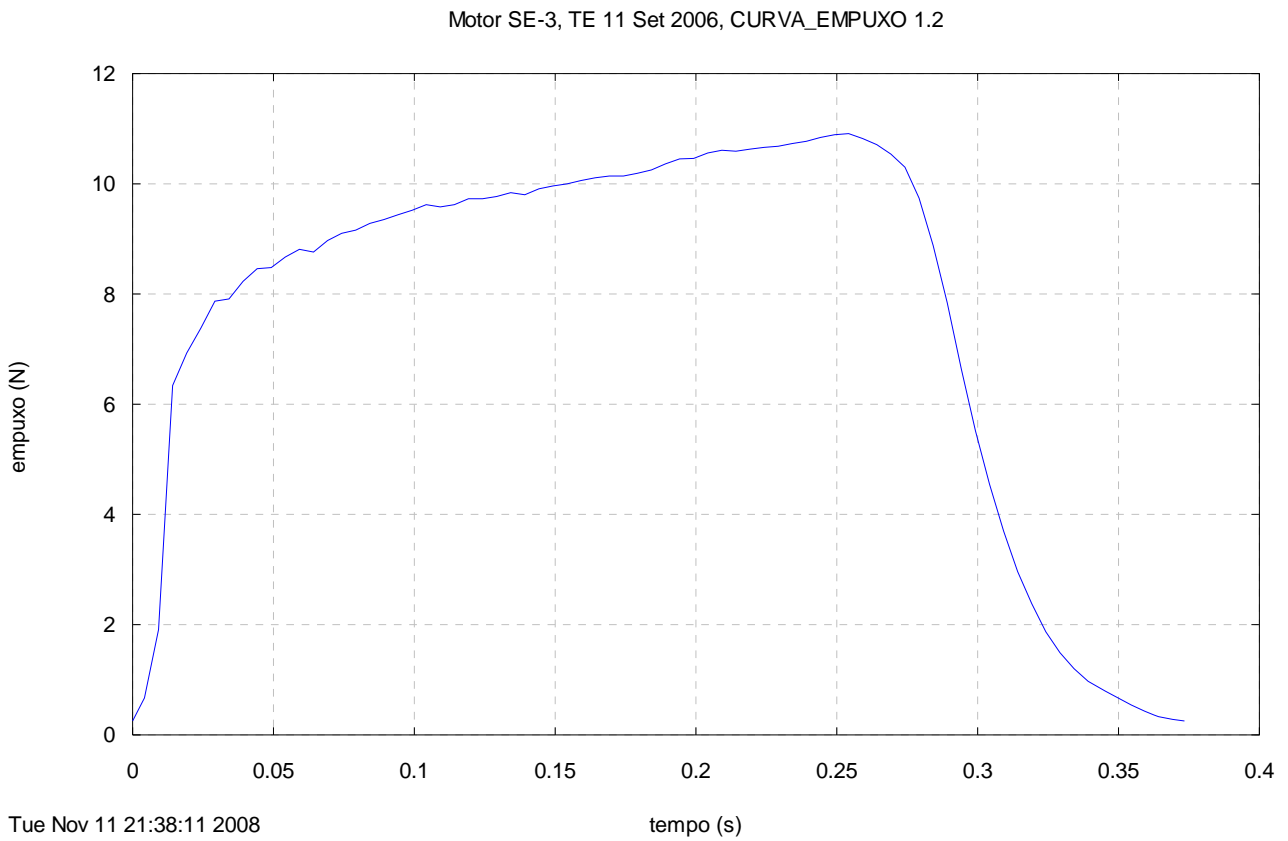


**Figura 5. Foto mostrando o motor SE-3 em funcionamento.**

As Figuras 6 a 37 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 de cada curva foram definidos com o valor do empuxo em 0,25 N, que representa dez vezes a precisão básica da célula de carga usada; valores menores podem captar ruído da célula; e valores maiores podem afetar os parâmetros da curva.

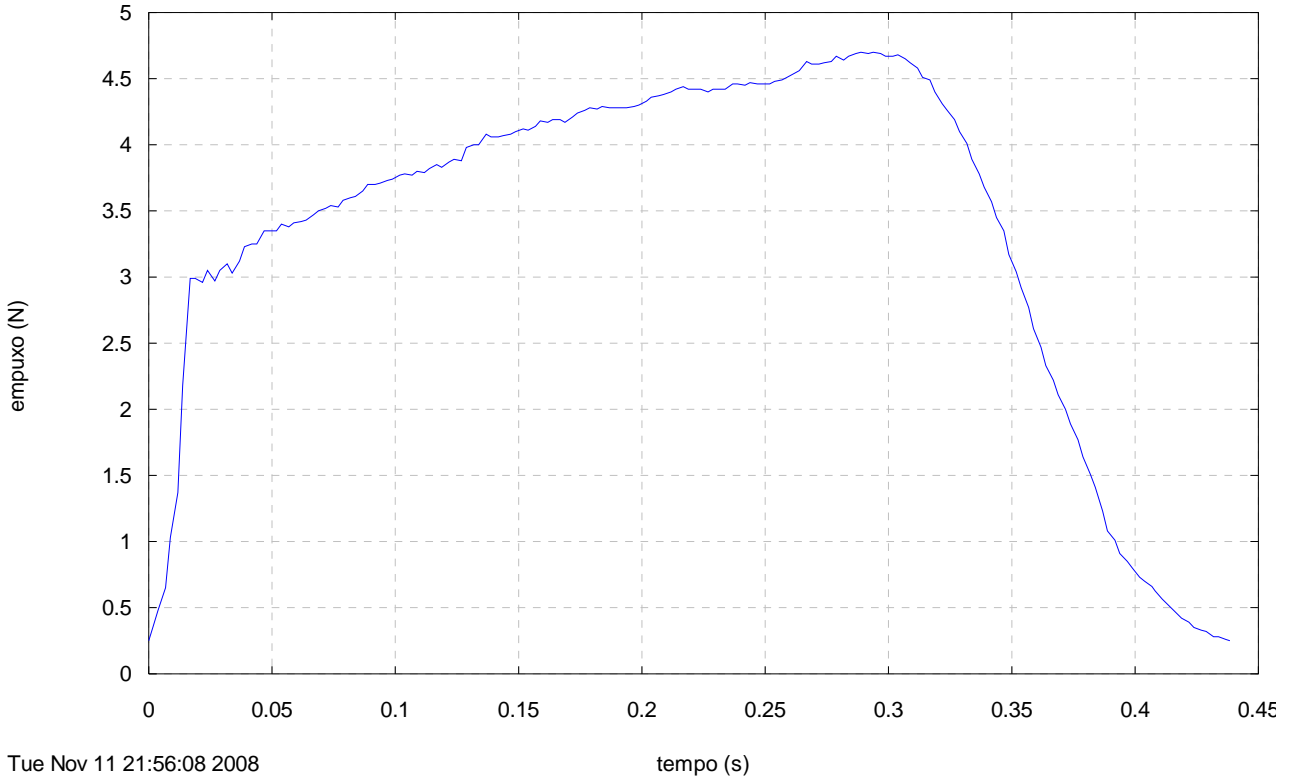


**Figura 6. Curva empuxo versus tempo processada do motor-foguete SE-1.**



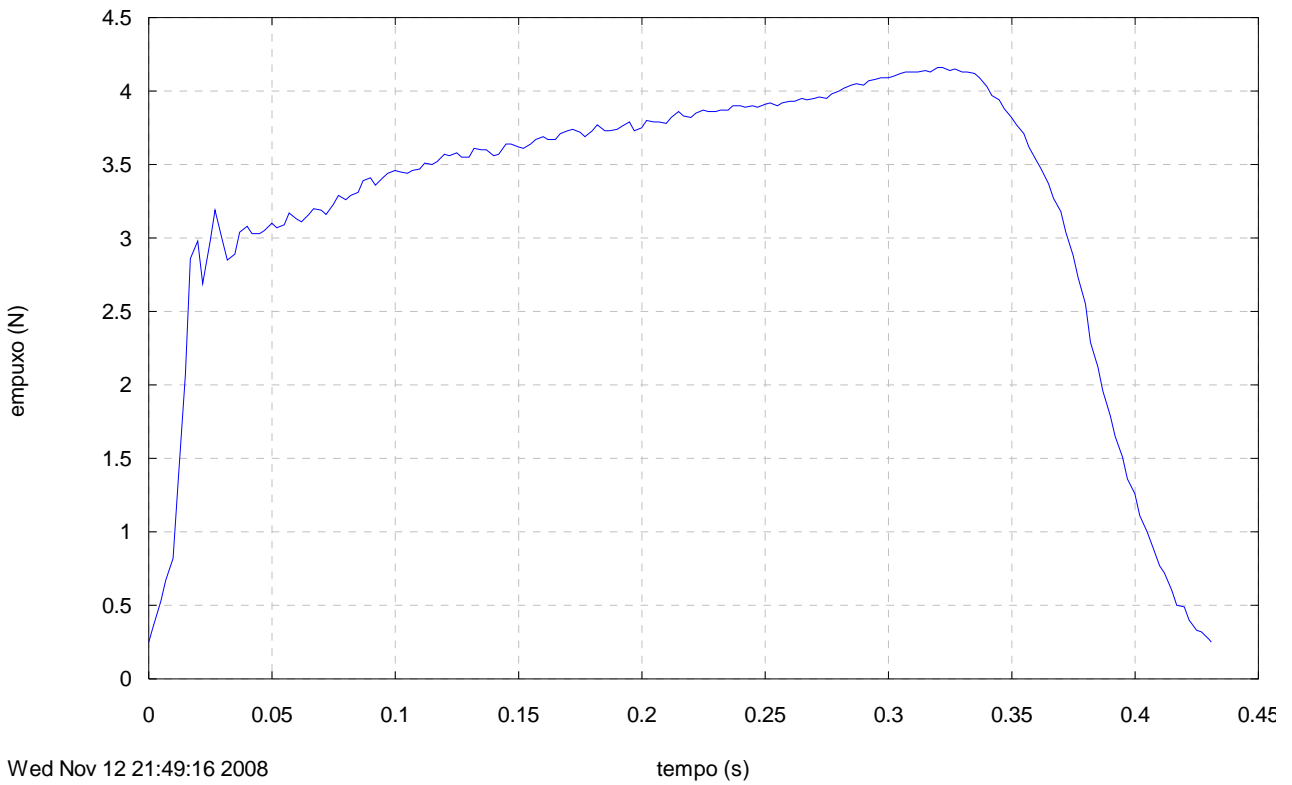
**Figura 7. Curva empuxo versus tempo processada do motor-foguete SE-3.**

Motor SE-4, TE 5 Out 2006, CURVA\_EMPUXO 1.2



**Figura 8. Curva empuxo versus tempo processada do motor-foguete SE-4.**

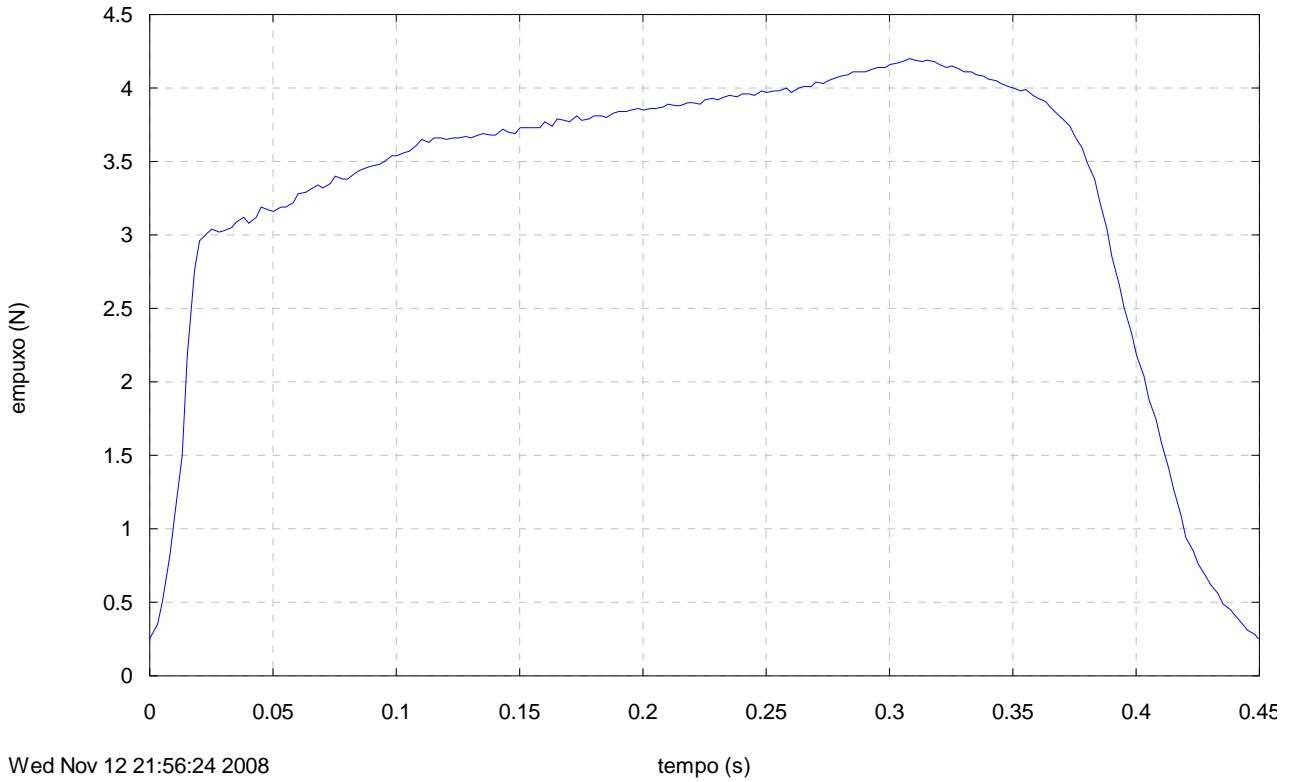
Motor SE-5, TE 5 Out 2006, CURVA\_EMPUXO 1.2



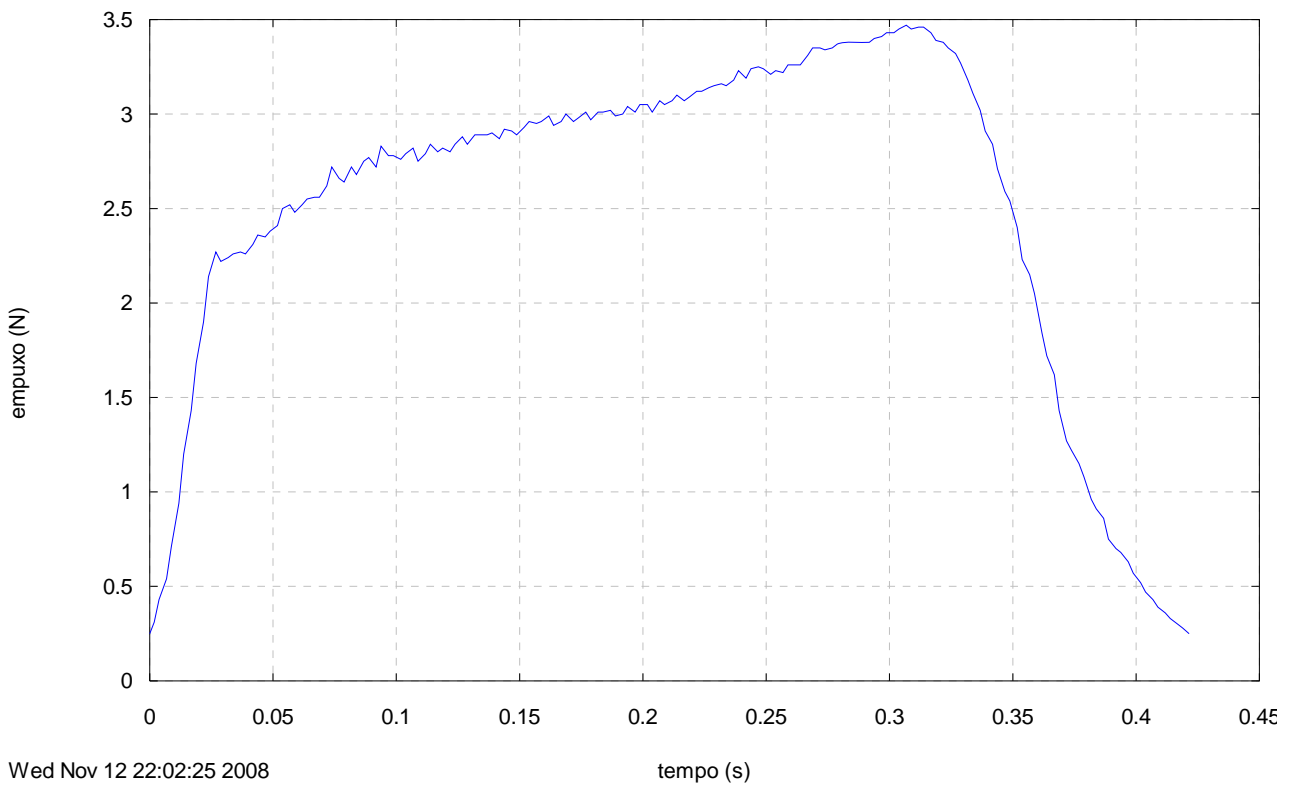
**Figura 9. Curva empuxo versus tempo processada do motor-foguete SE-5.**

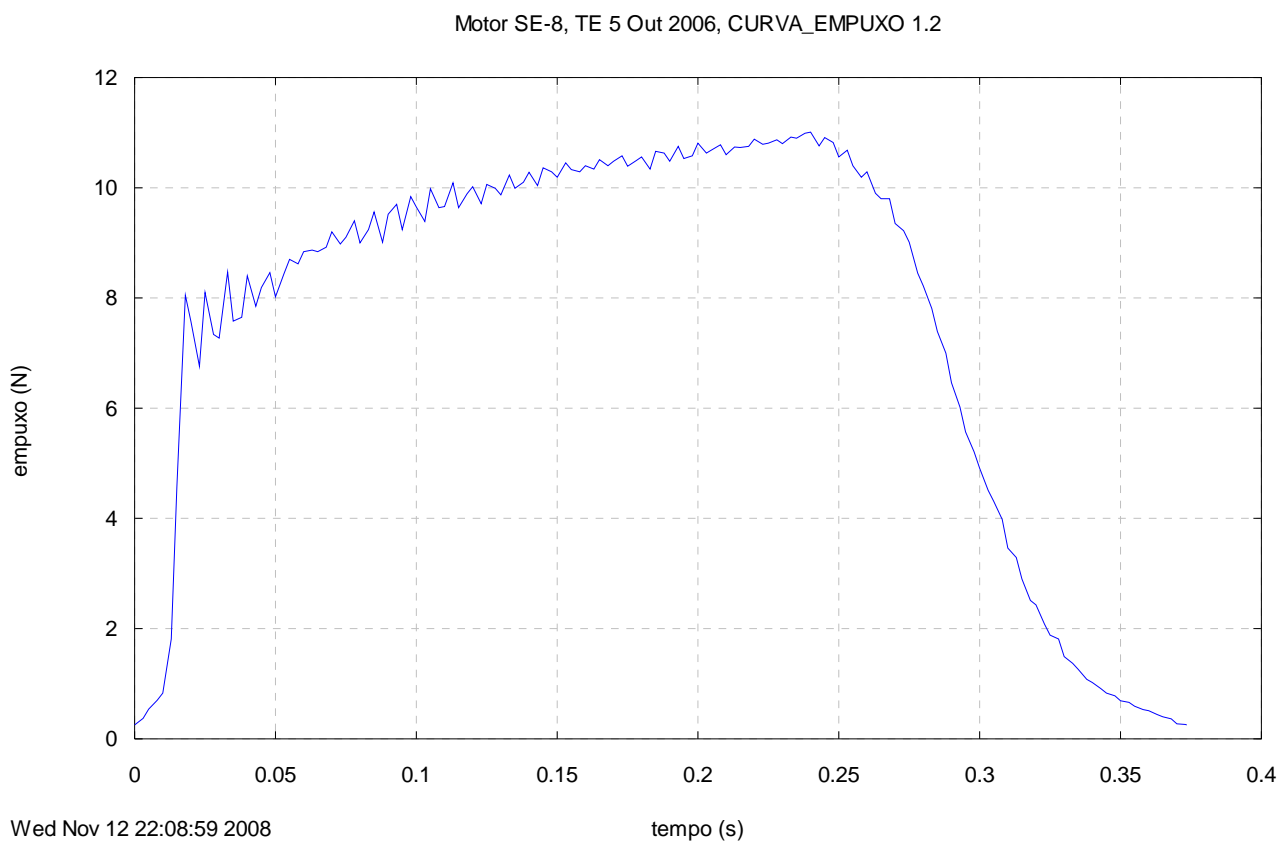


Motor SE-6, TE 5 Out 2006, CURVA\_EMPUXO 1.2

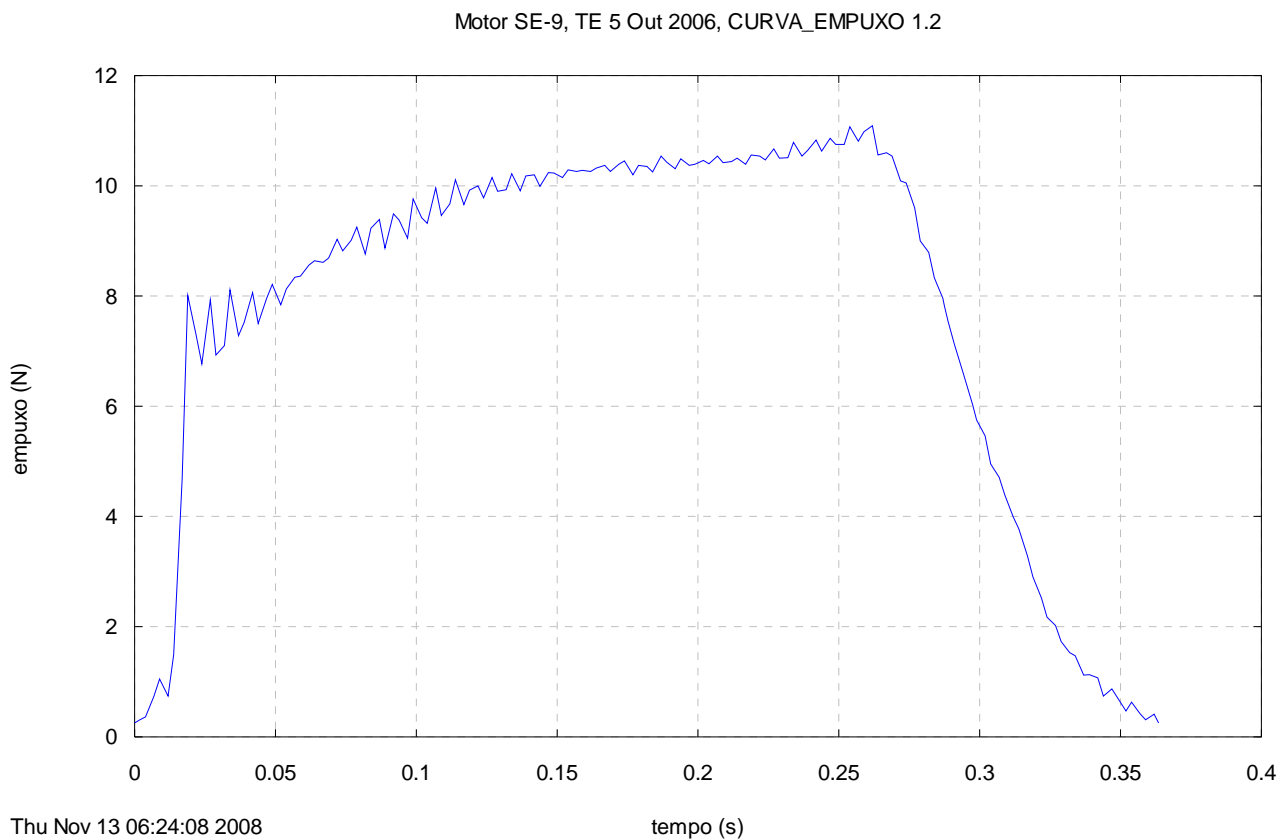
**Figura 10. Curva empuxo versus tempo processada do motor-foguete SE-6.**

Motor SE-7, TE 5 Out 2006, CURVA\_EMPUXO 1.2

**Figura 11. Curva empuxo versus tempo processada do motor-foguete SE-7.**

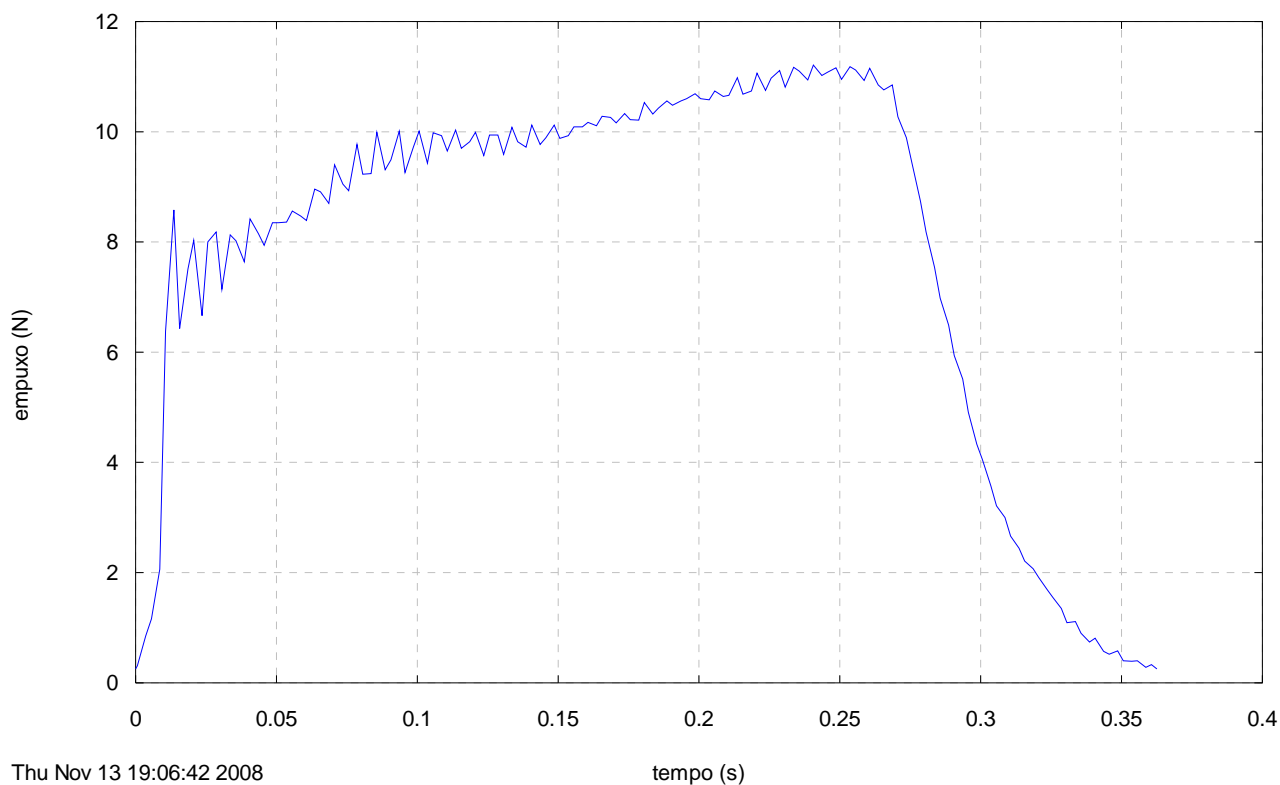


**Figura 12. Curva empuxo versus tempo processada do motor-foguete SE-8.**

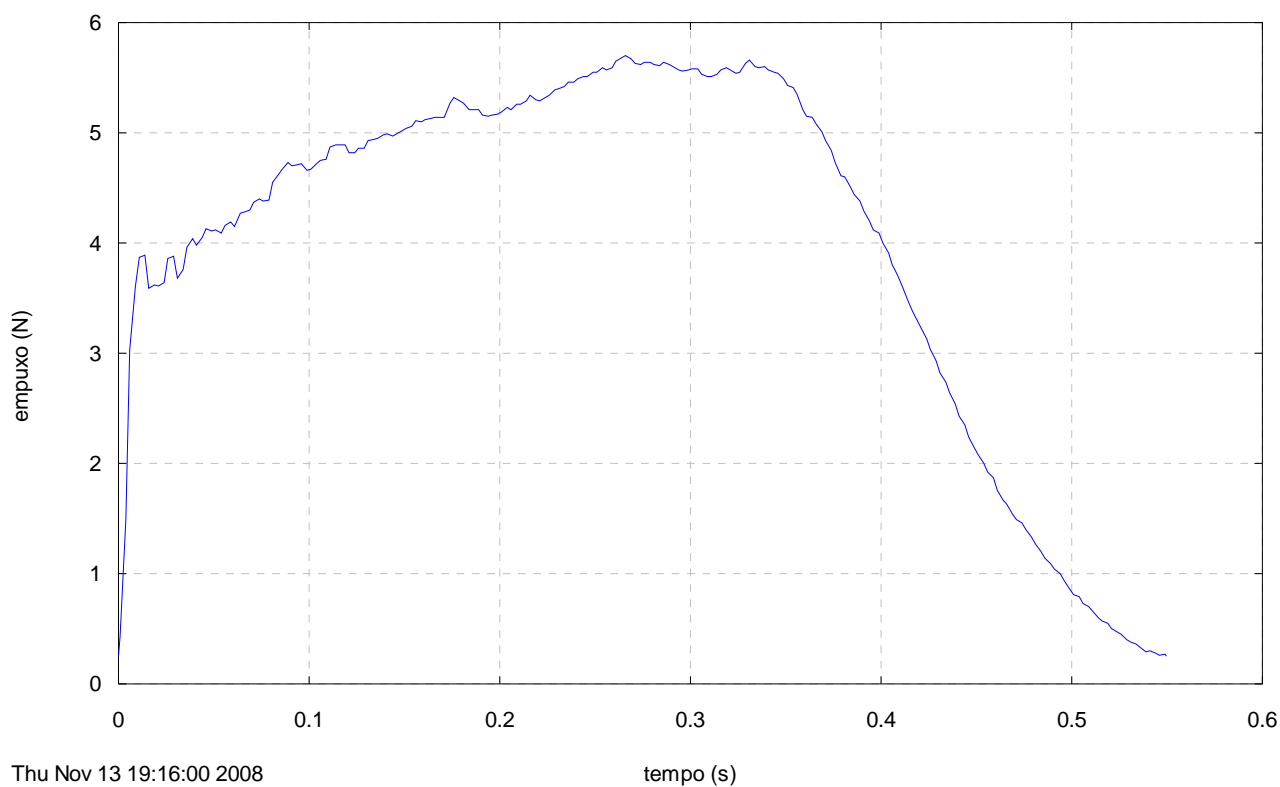


**Figura 13. Curva empuxo versus tempo processada do motor-foguete SE-9.**

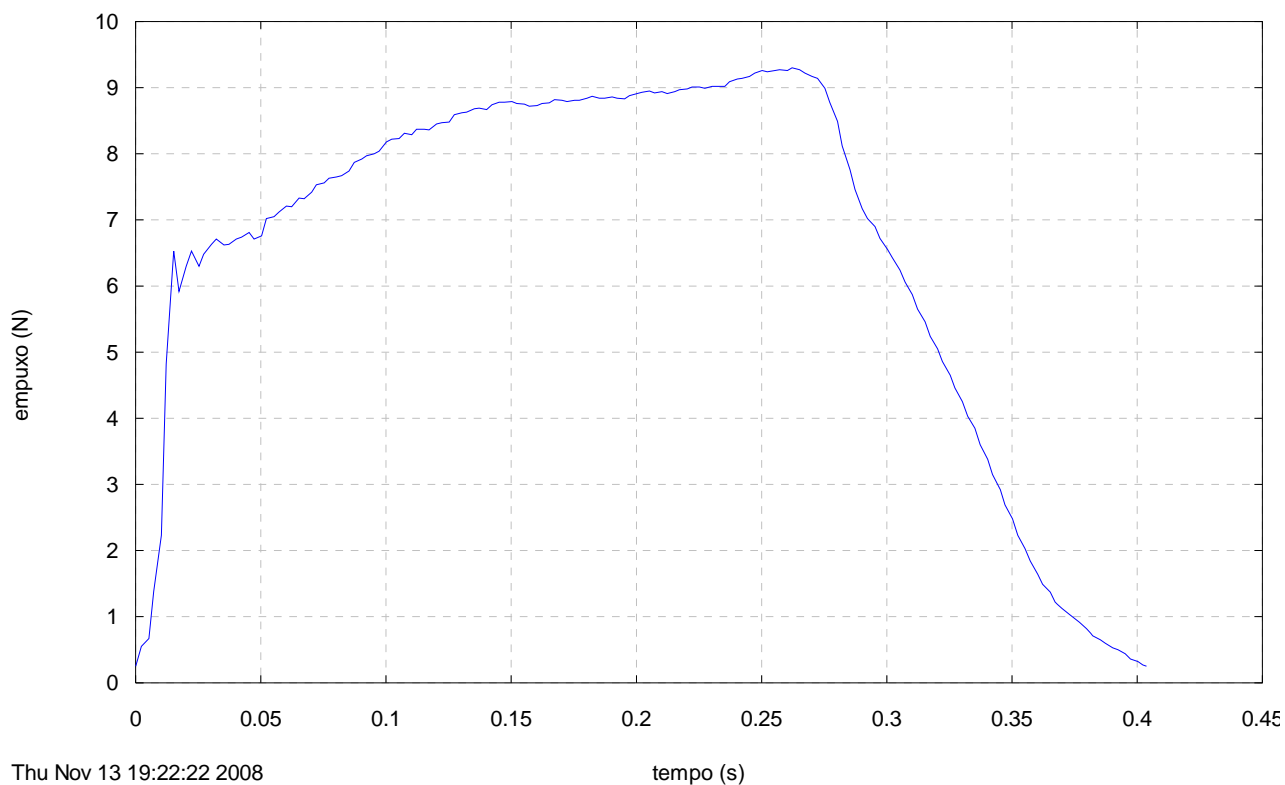
Motor SE-10, TE 5 Out 2006, CURVA\_EMPUXO 1.2

**Figura 14. Curva empuxo versus tempo processada do motor-foguete SE-10.**

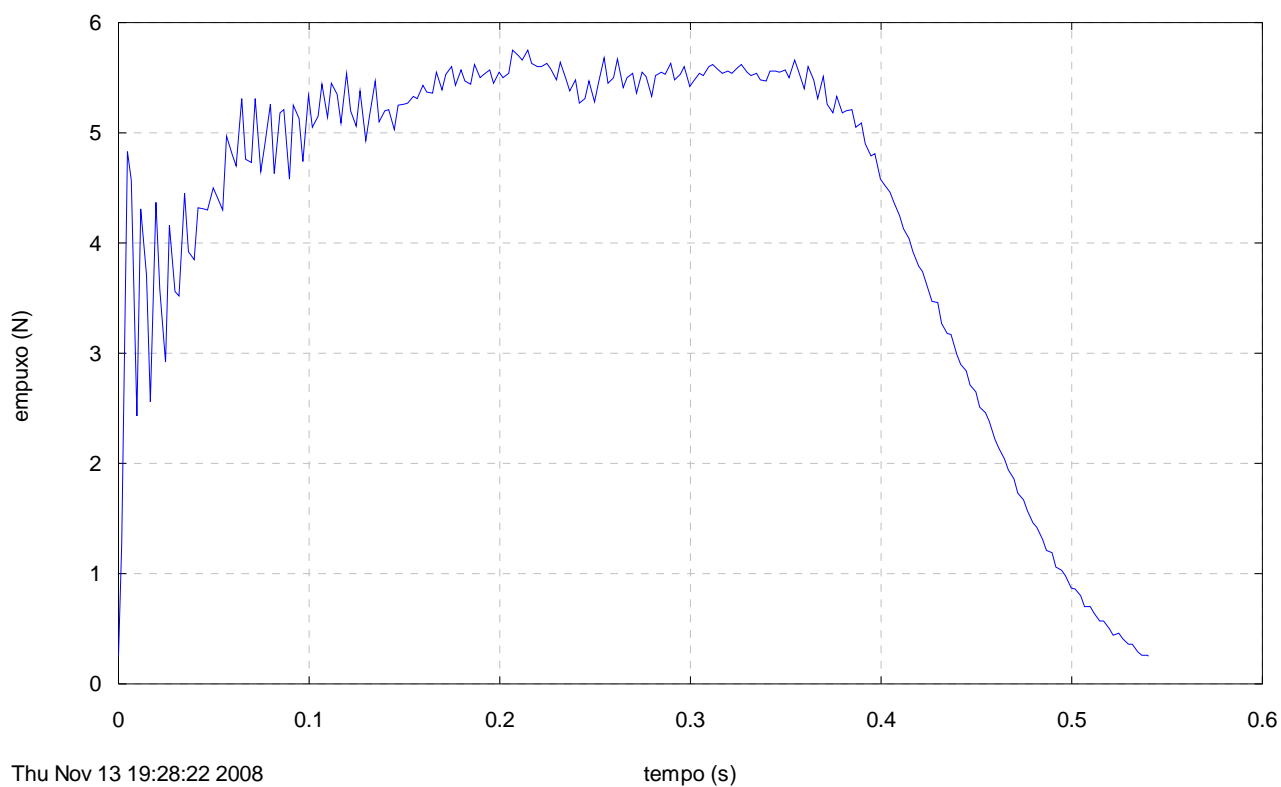
Motor SE-12, TE 5 Out 2006, CURVA\_EMPUXO 1.2

**Figura 15. Curva empuxo versus tempo processada do motor-foguete SE-12.**

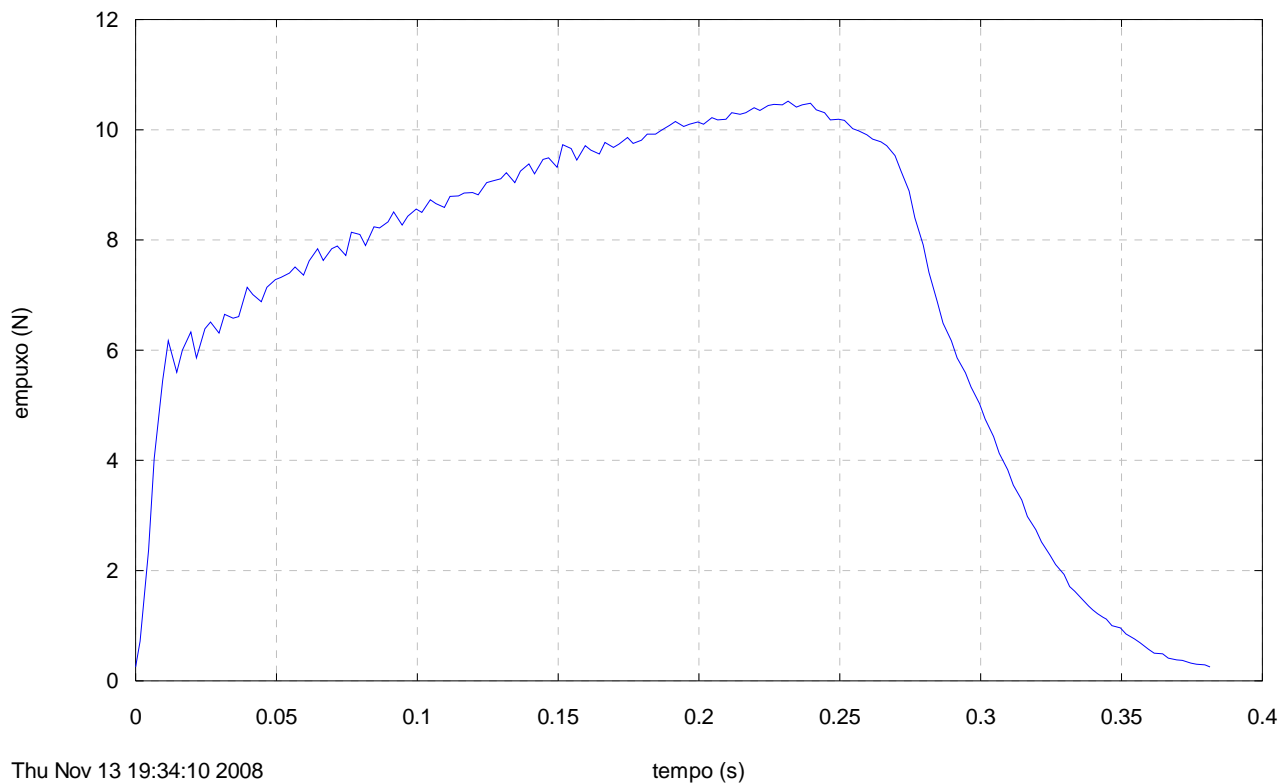
Motor SE-13, TE 5 Out 2006, CURVA\_EMPUXO 1.2

**Figura 16. Curva empuxo versus tempo processada do motor-foguete SE-13.**

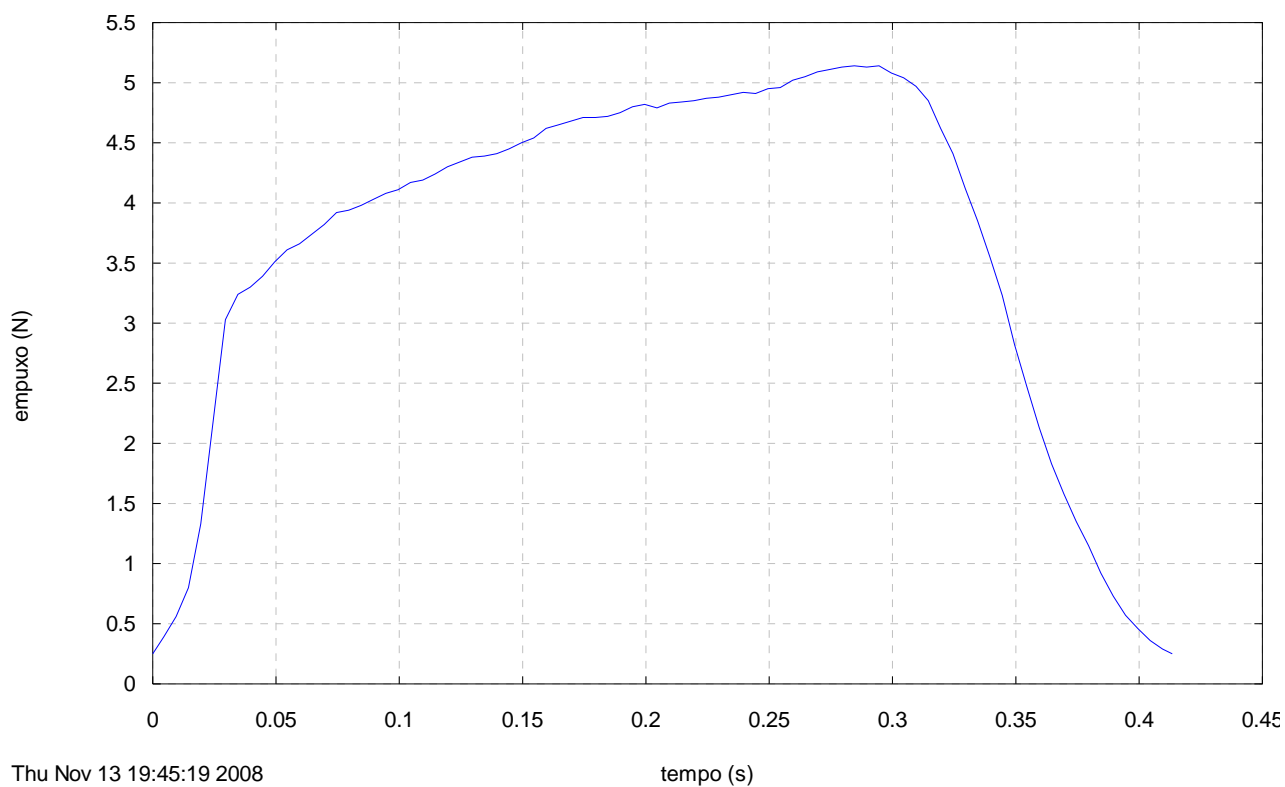
Motor SE-14, TE 5 Out 2006, CURVA\_EMPUXO 1.2

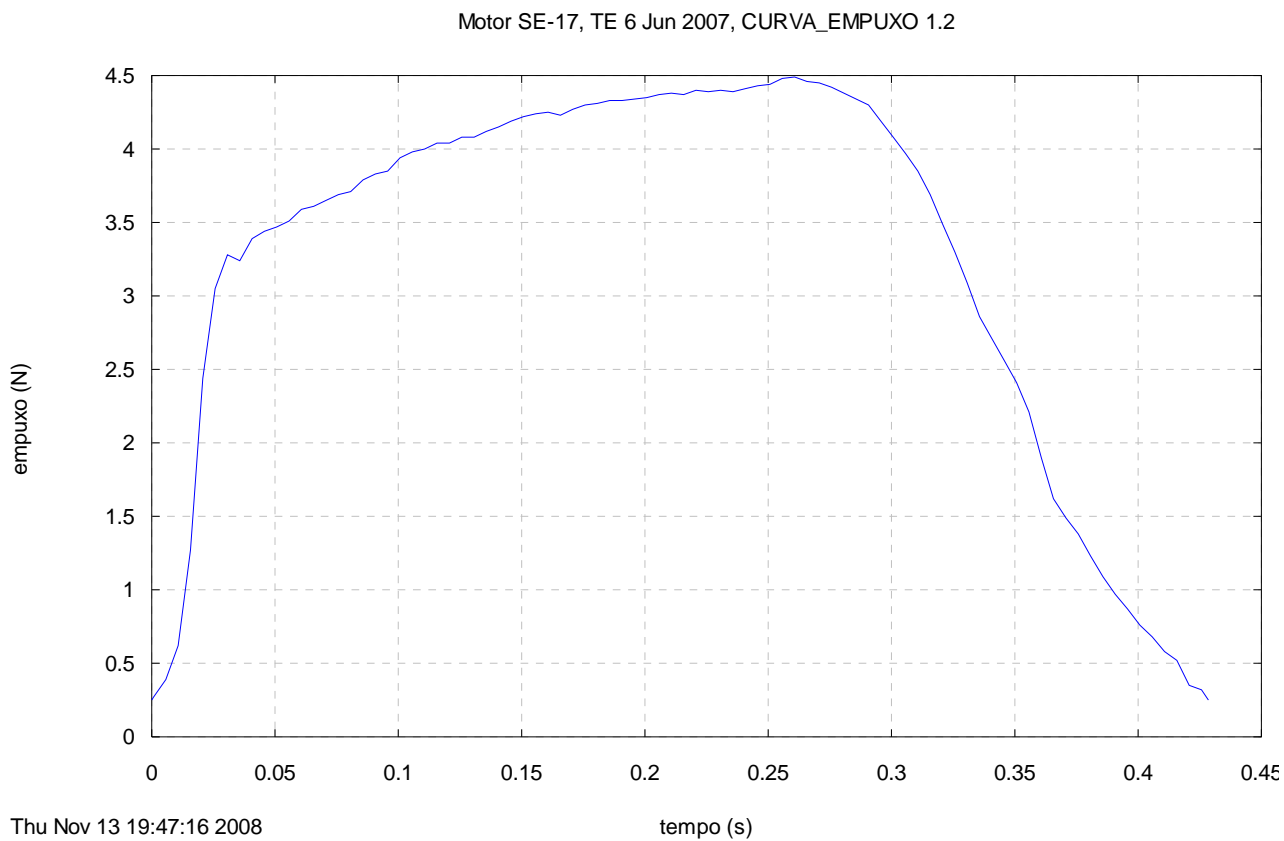
**Figura 17. Curva empuxo versus tempo processada do motor-foguete SE-14.**

Motor SE-15, TE 5 Out 2006, CURVA\_EMPUXO 1.2

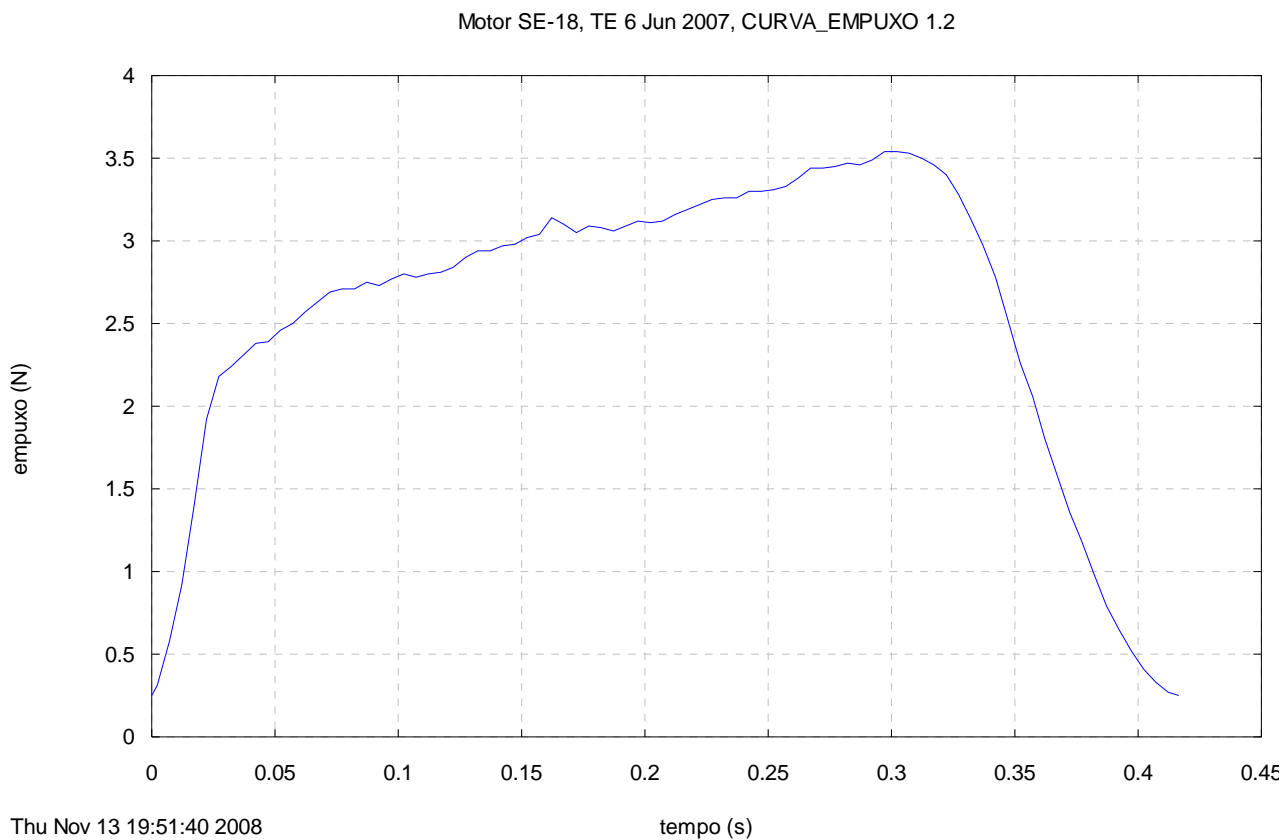
**Figura 18. Curva empuxo versus tempo processada do motor-foguete SE-15.**

Motor SE-16, TE 6 Jun 2007, CURVA\_EMPUXO 1.2

**Figura 19. Curva empuxo versus tempo processada do motor-foguete SE-16.**

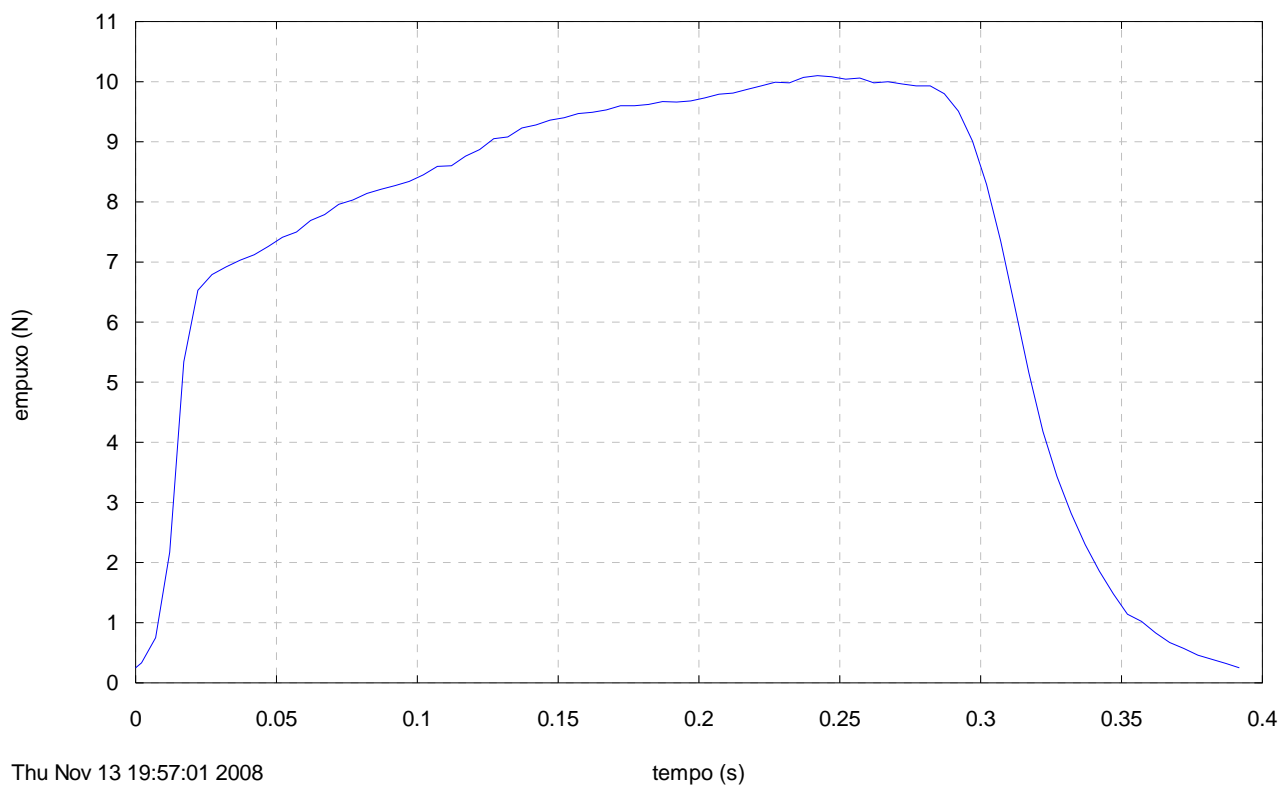


**Figura 20. Curva empuxo versus tempo processada do motor-foguete SE-17.**

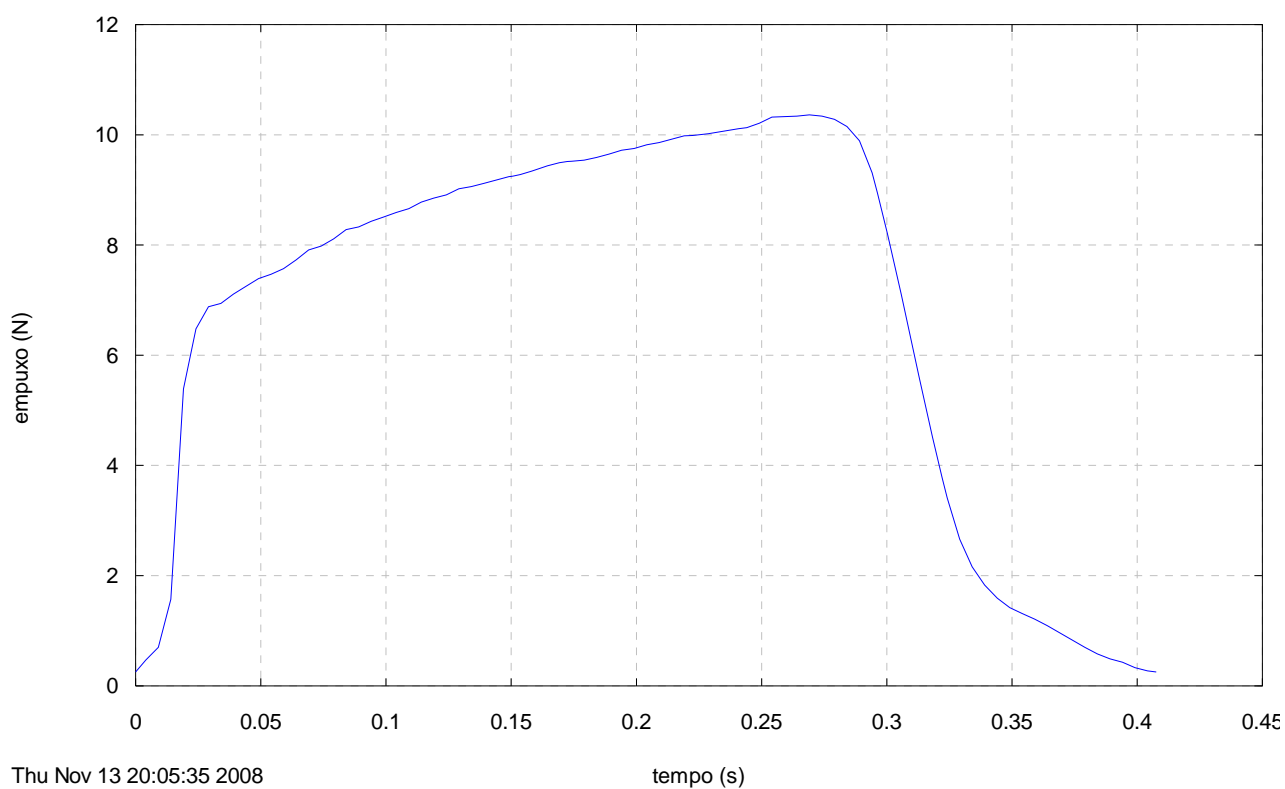


**Figura 21. Curva empuxo versus tempo processada do motor-foguete SE-18.**

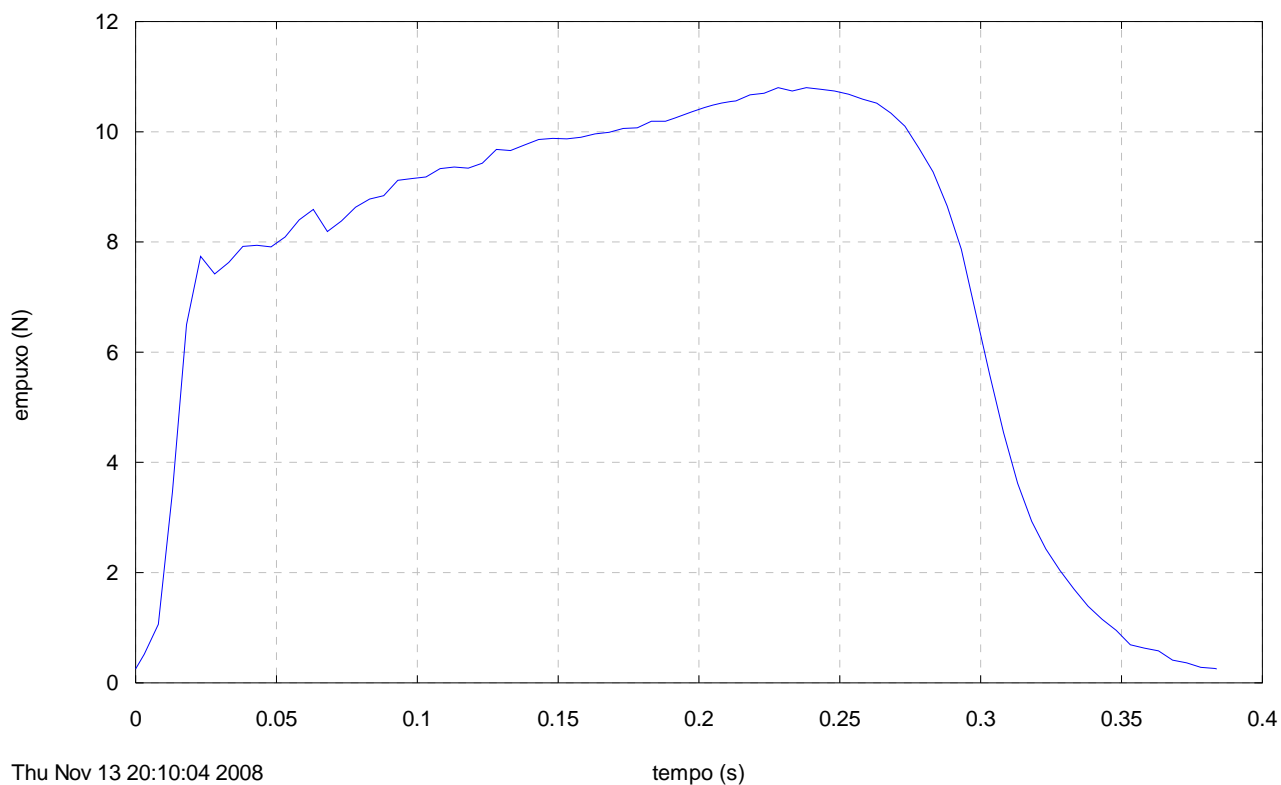
Motor SE-19, TE 6 Jun 2007, CURVA\_EMPUXO 1.2

**Figura 22. Curva empuxo versus tempo processada do motor-foguete SE-19.**

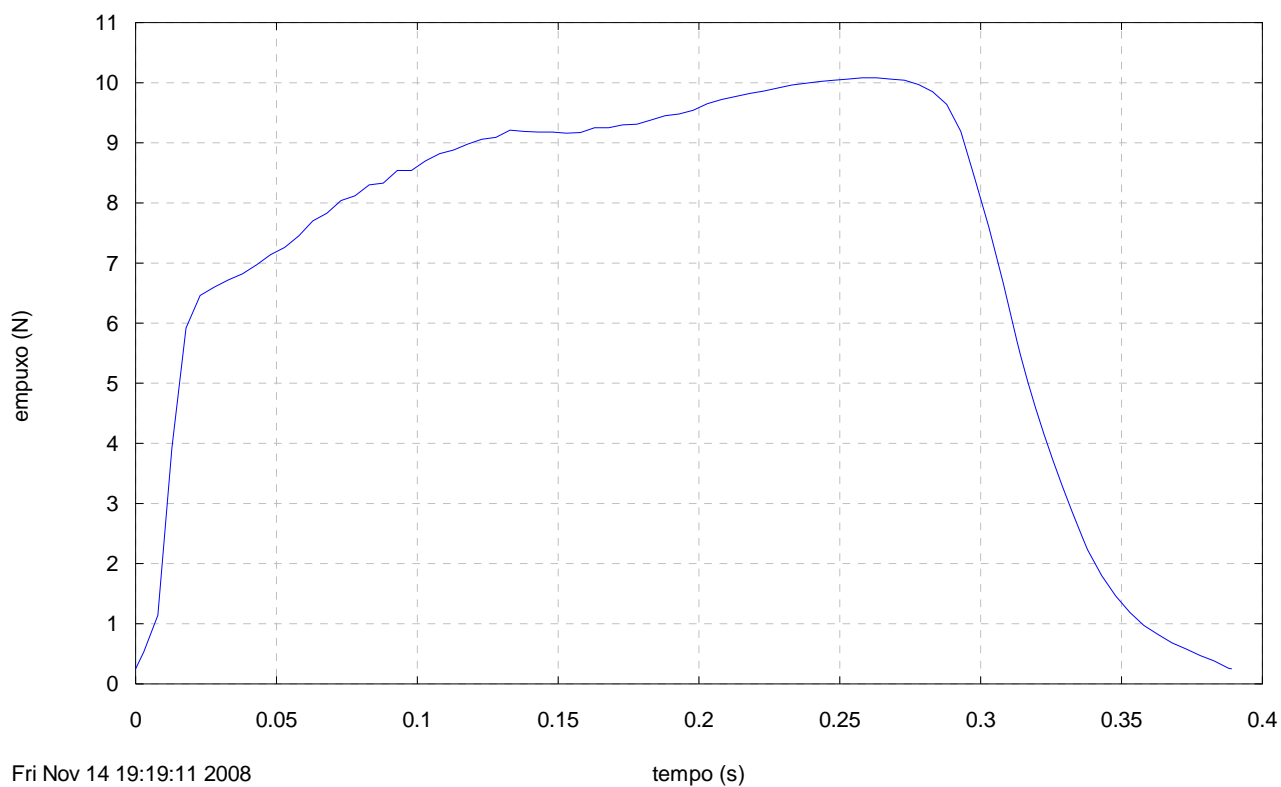
Motor SE-20, TE 6 Jun 2007, CURVA\_EMPUXO 1.2

**Figura 23. Curva empuxo versus tempo processada do motor-foguete SE-20.**

Motor SE-21, TE 6 Jun 2007, CURVA\_EMPUXO 1.2

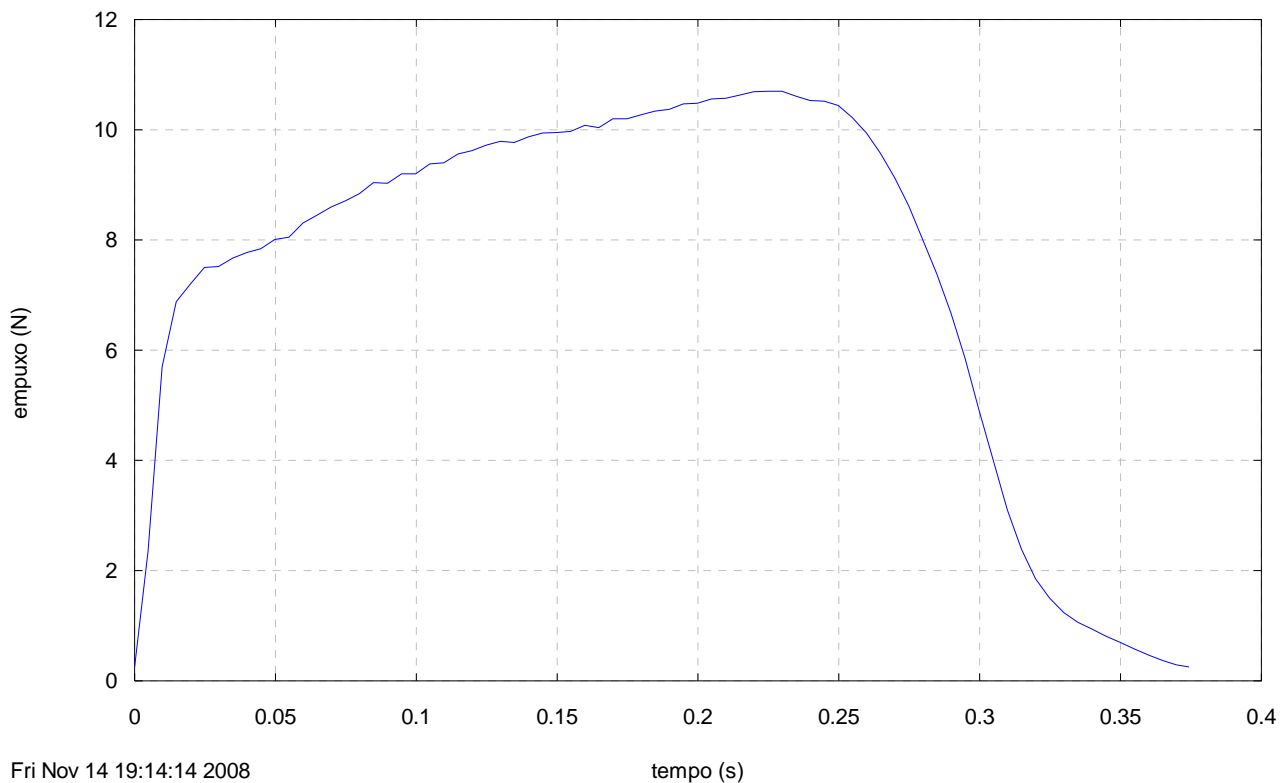
**Figura 24. Curva empuxo versus tempo processada do motor-foguete SE-21.**

Motor SE-22, TE 6 Jun 2007, CURVA\_EMPUXO 1.2

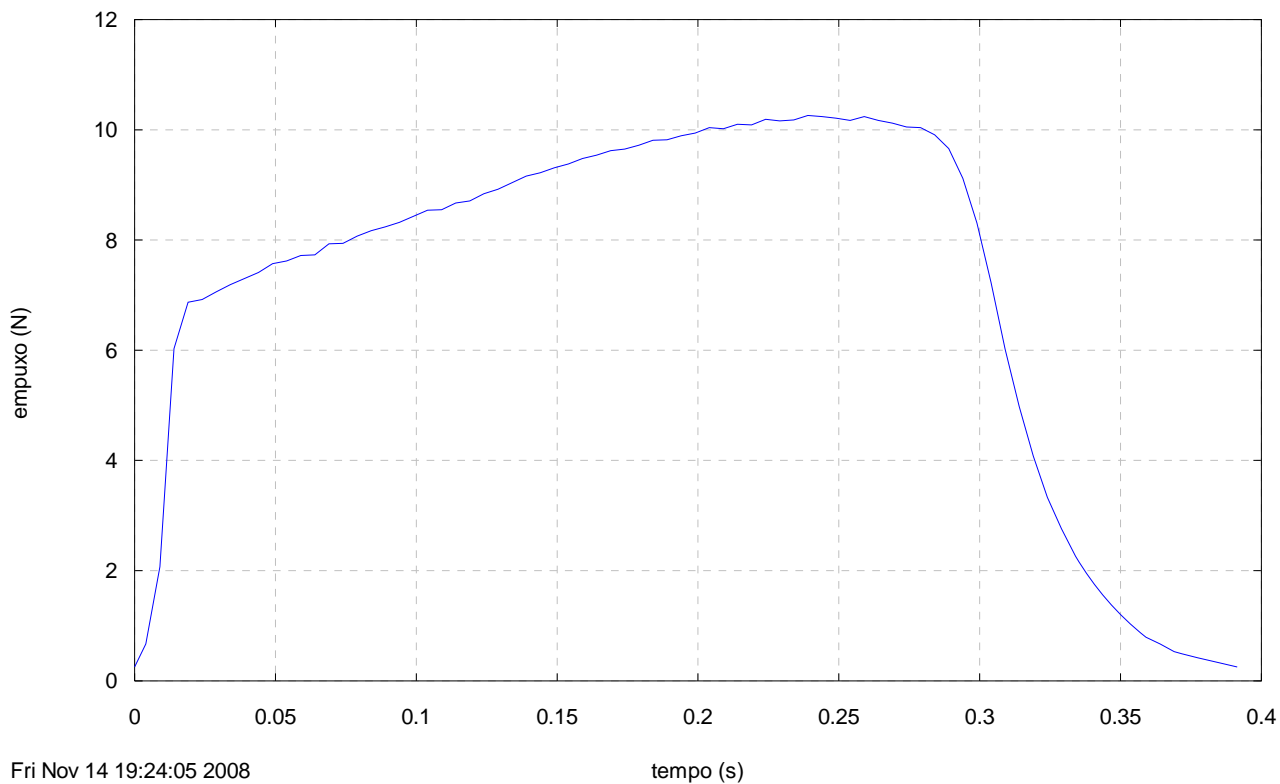
**Figura 25. Curva empuxo versus tempo processada do motor-foguete SE-22.**



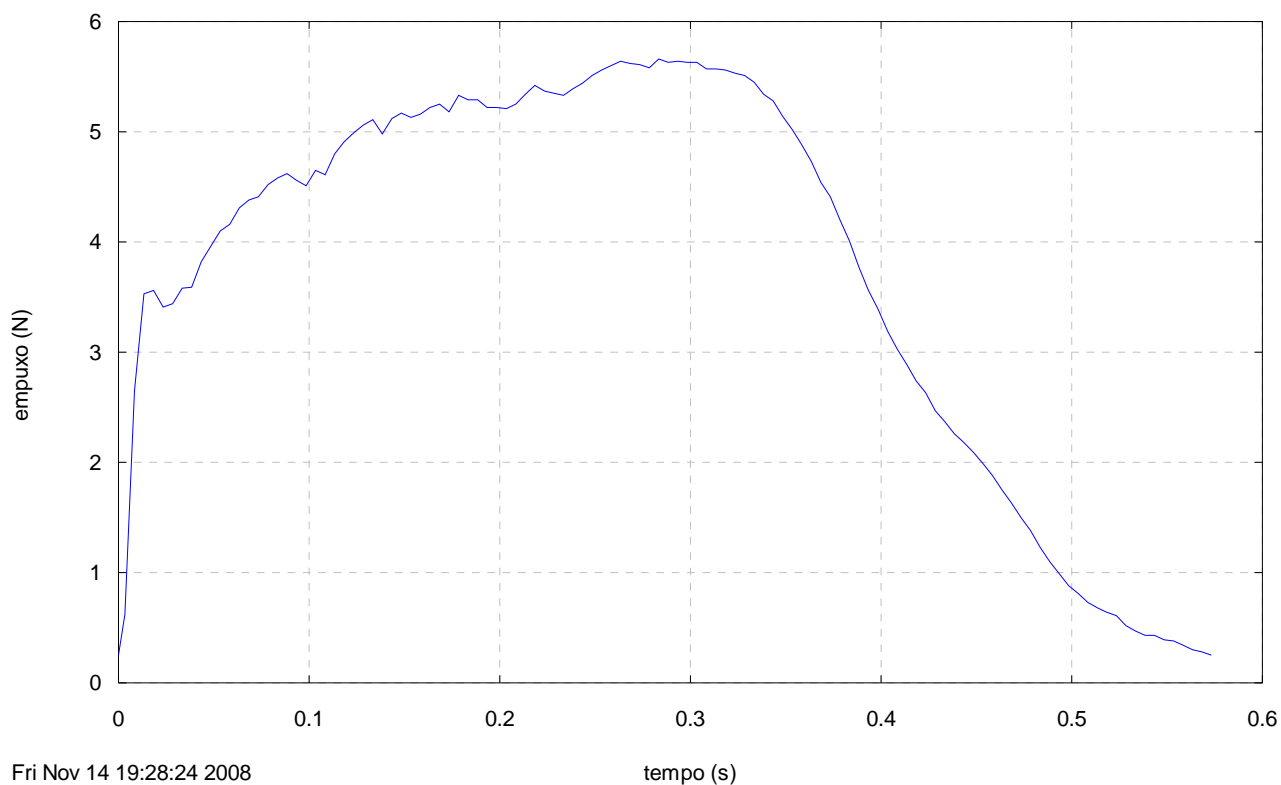
Motor SE-23, TE 6 Jun 2007, CURVA\_EMPUXO 1.2

**Figura 26. Curva empuxo versus tempo processada do motor-foguete SE-23.**

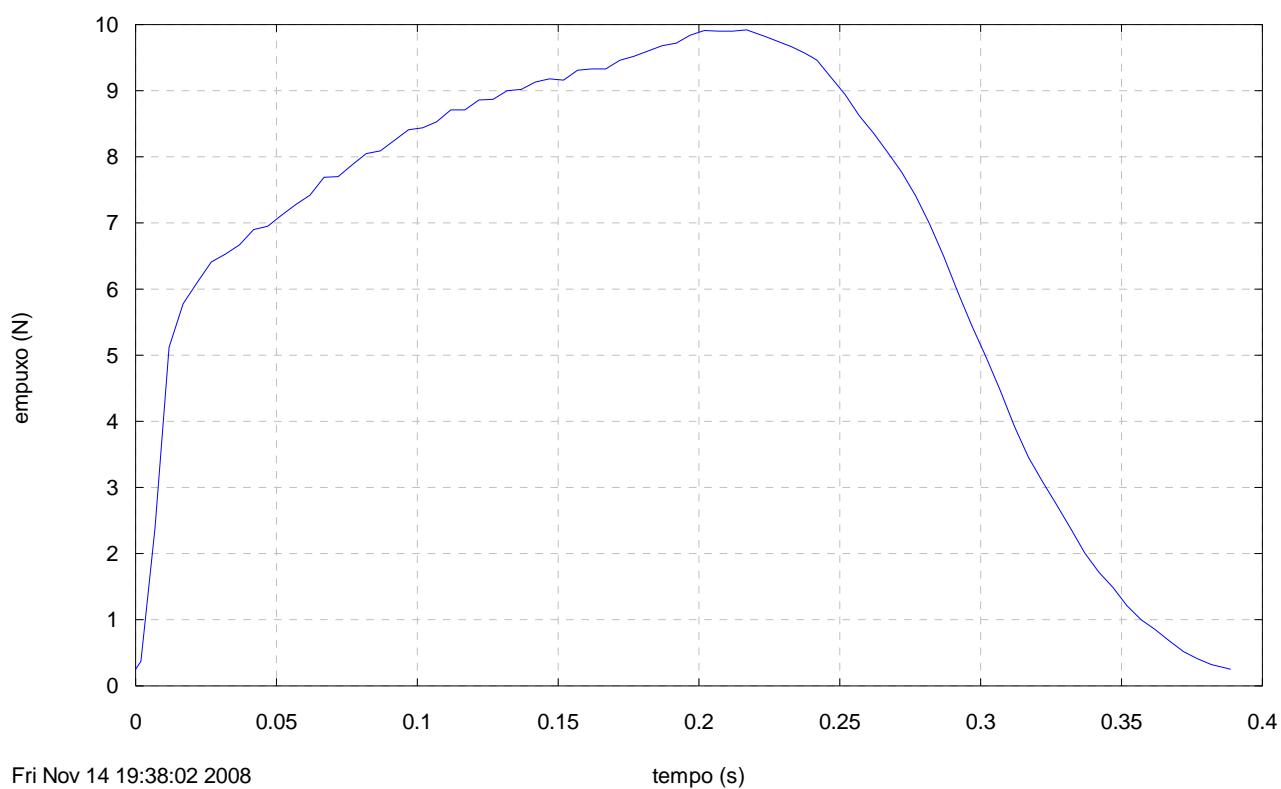
Motor SE-24, TE 6 Jun 2007, CURVA\_EMPUXO 1.2

**Figura 27. Curva empuxo versus tempo processada do motor-foguete SE-24.**

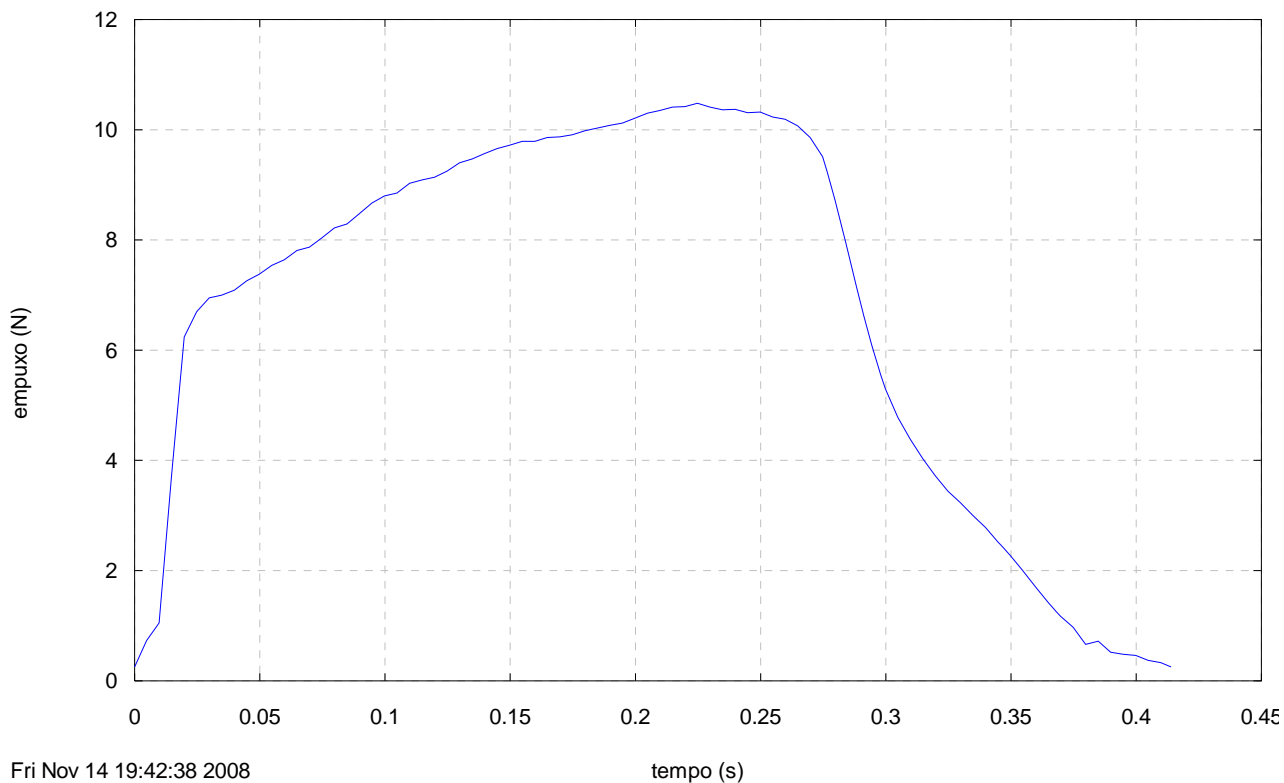
Motor SE-25, TE 6 Jun 2007, CURVA\_EMPUXO 1.2

**Figura 28. Curva empuxo versus tempo processada do motor-foguete SE-25.**

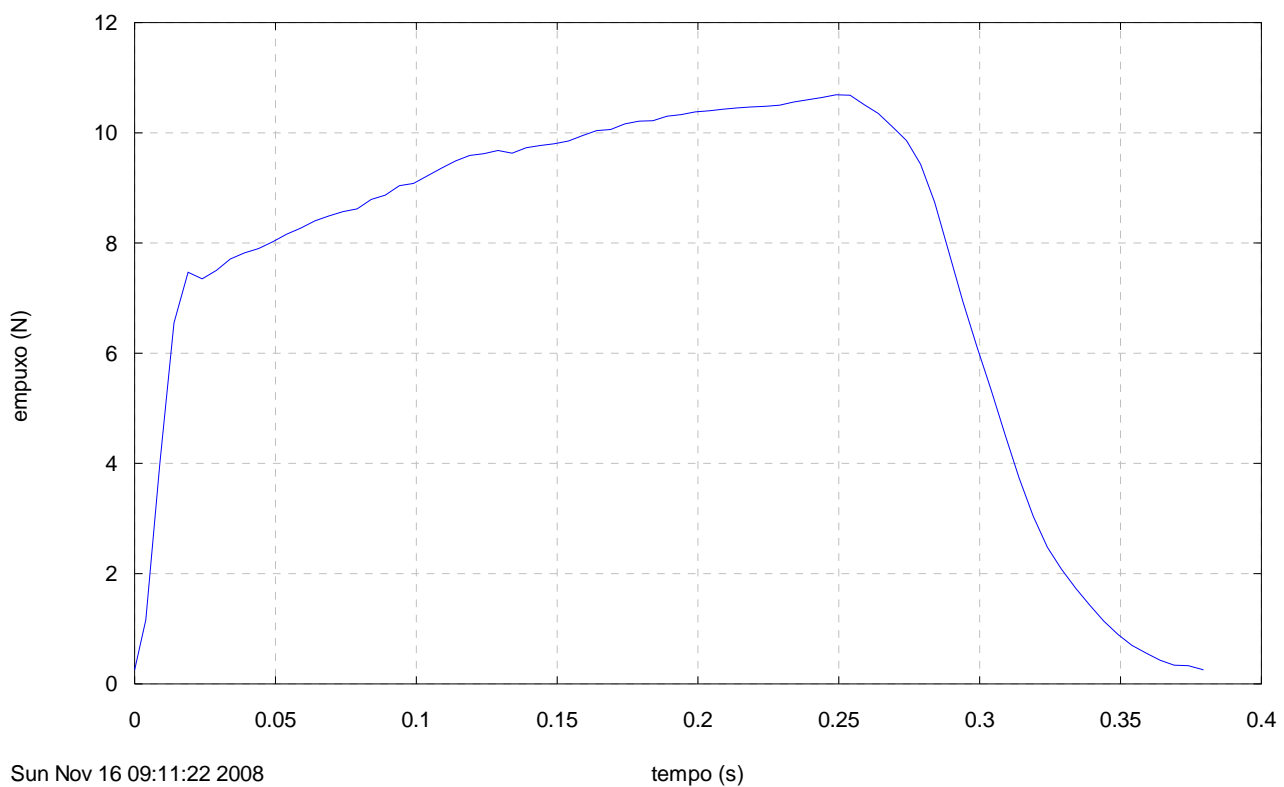
Motor SE-26, TE 6 Jun 2007, CURVA\_EMPUXO 1.2

**Figura 29. Curva empuxo versus tempo processada do motor-foguete SE-26.**

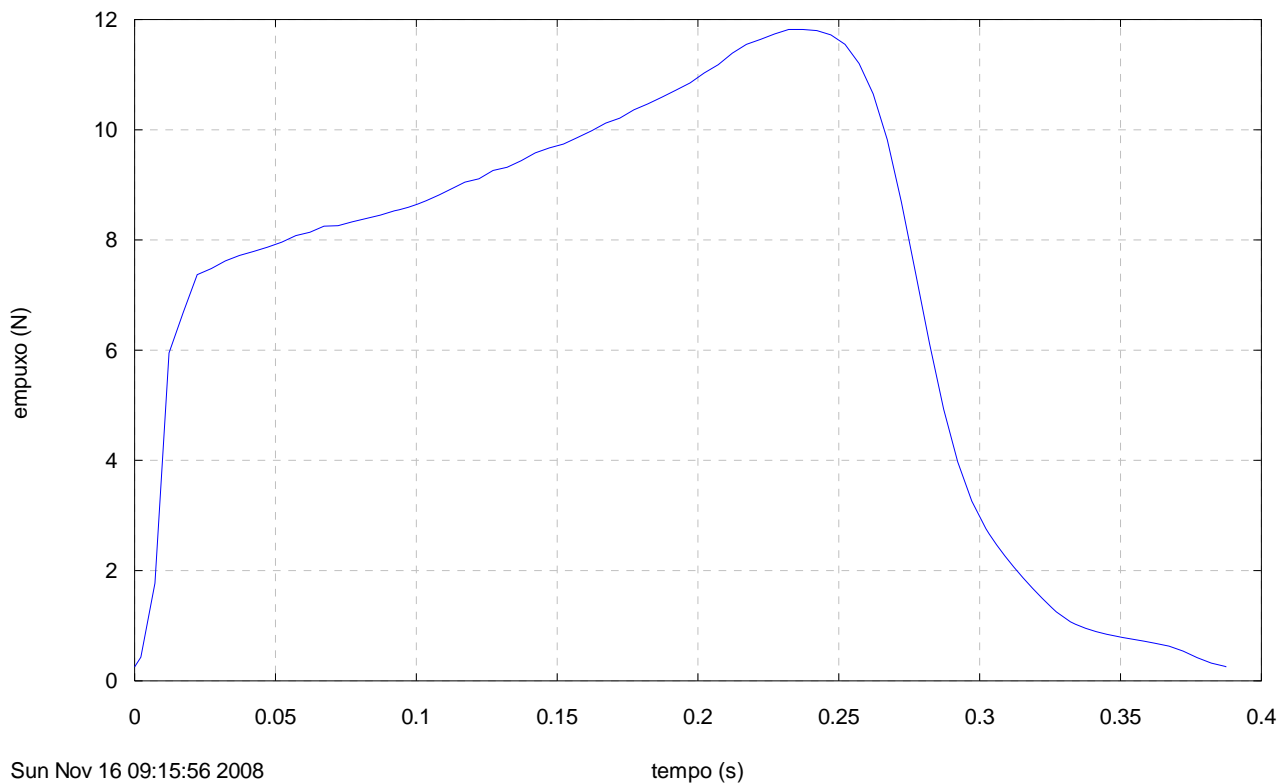
Motor SE-27, TE 6 Jun 2007, CURVA\_EMPUXO 1.2

**Figura 30. Curva empuxo versus tempo processada do motor-foguete SE-27.**

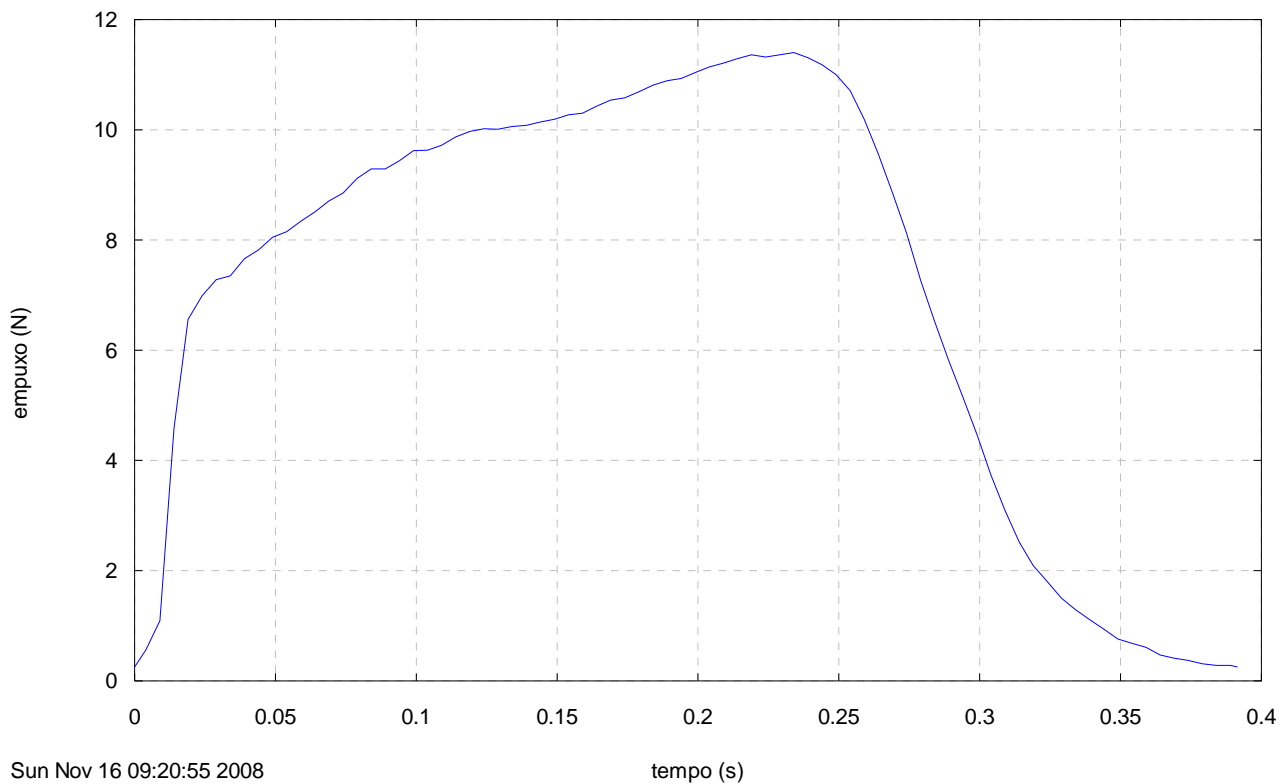
Motor SE-28, TE 5 Mai 2008, CURVA\_EMPUXO 1.2

**Figura 31. Curva empuxo versus tempo processada do motor-foguete SE-28.**

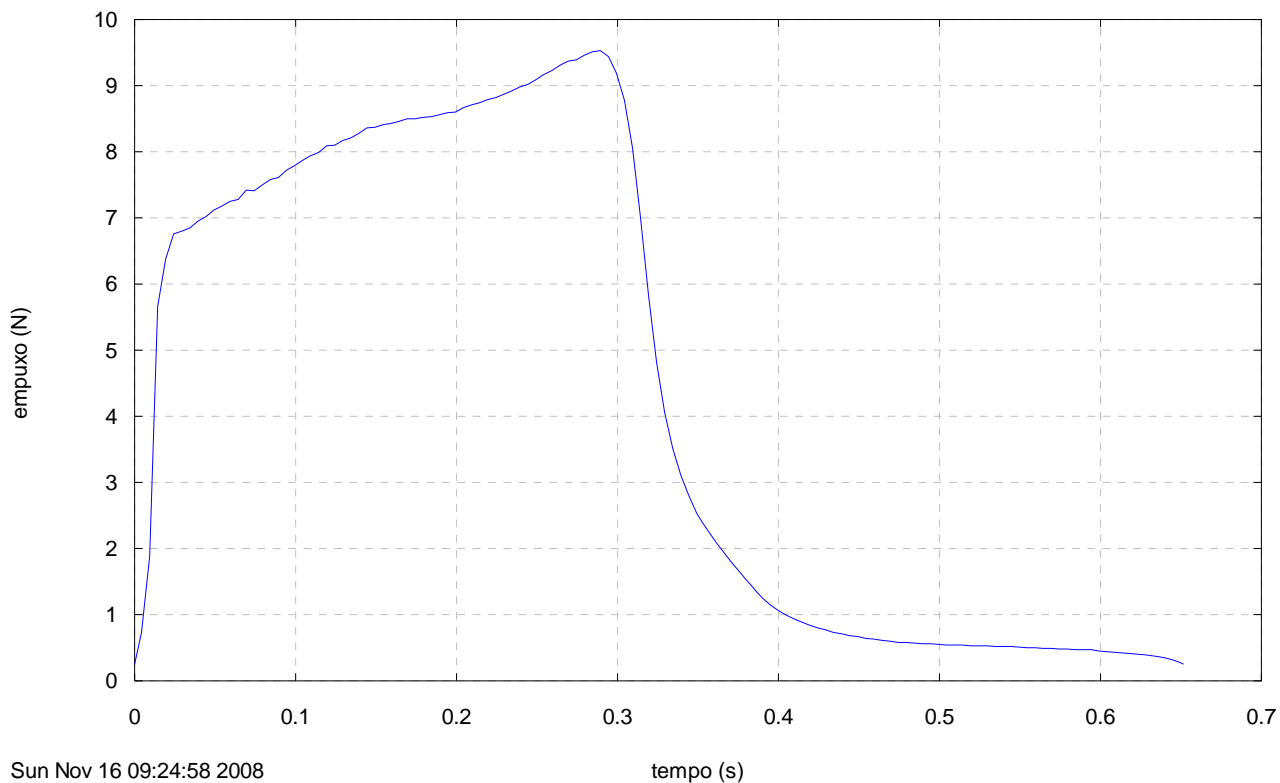
Motor SE-29, TE 5 Mai 2008, CURVA\_EMPUXO 1.2

**Figura 32. Curva empuxo versus tempo processada do motor-foguete SE-29.**

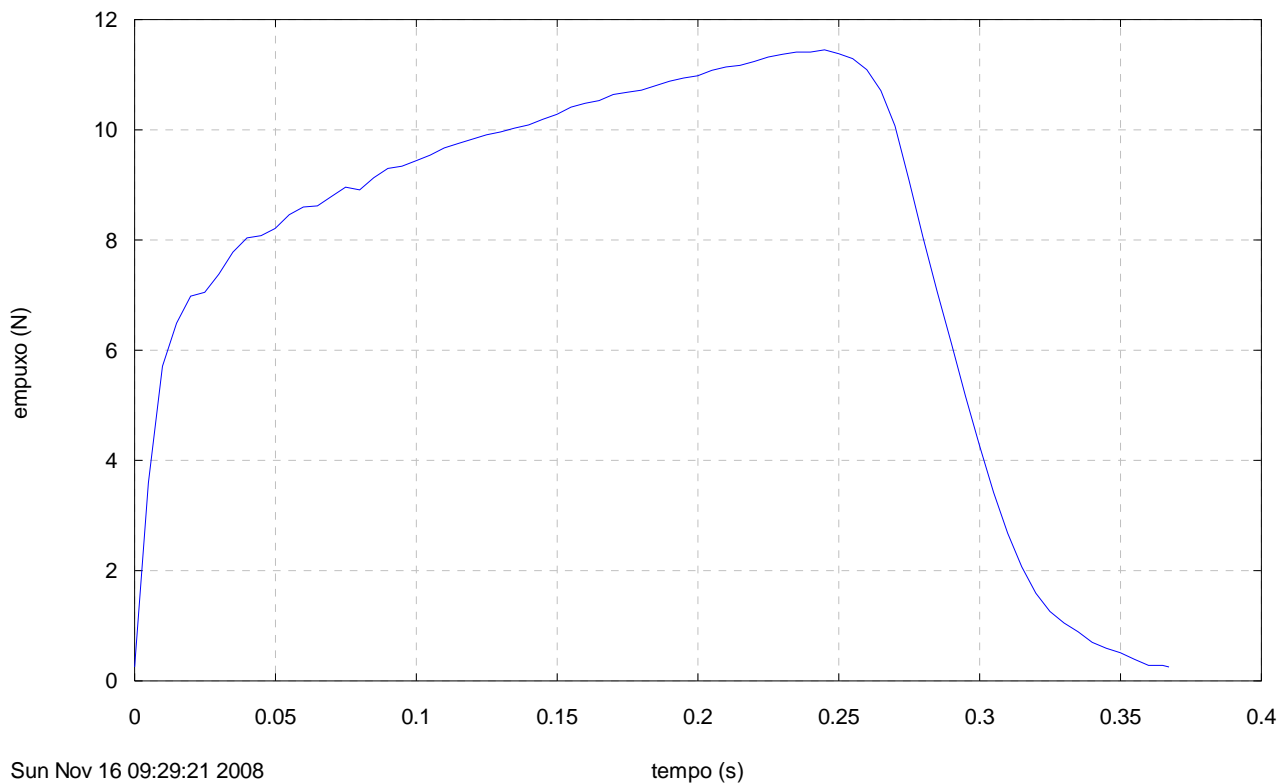
Motor SE-30, TE 5 Mai 2008, CURVA\_EMPUXO 1.2

**Figura 33. Curva empuxo versus tempo processada do motor-foguete SE-30.**

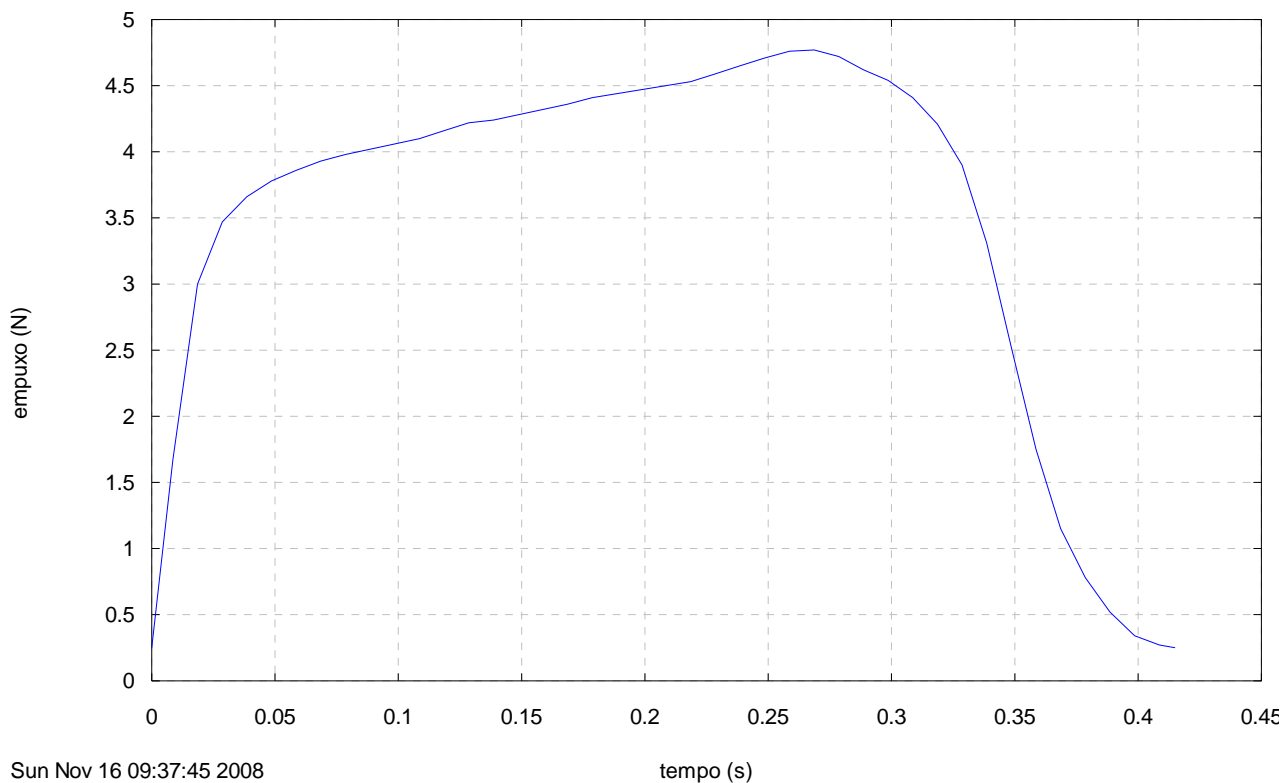
Motor SE-31, TE 5 Mai 2008, CURVA\_EMPUXO 1.2

**Figura 34. Curva empuxo versus tempo processada do motor-foguete SE-31.**

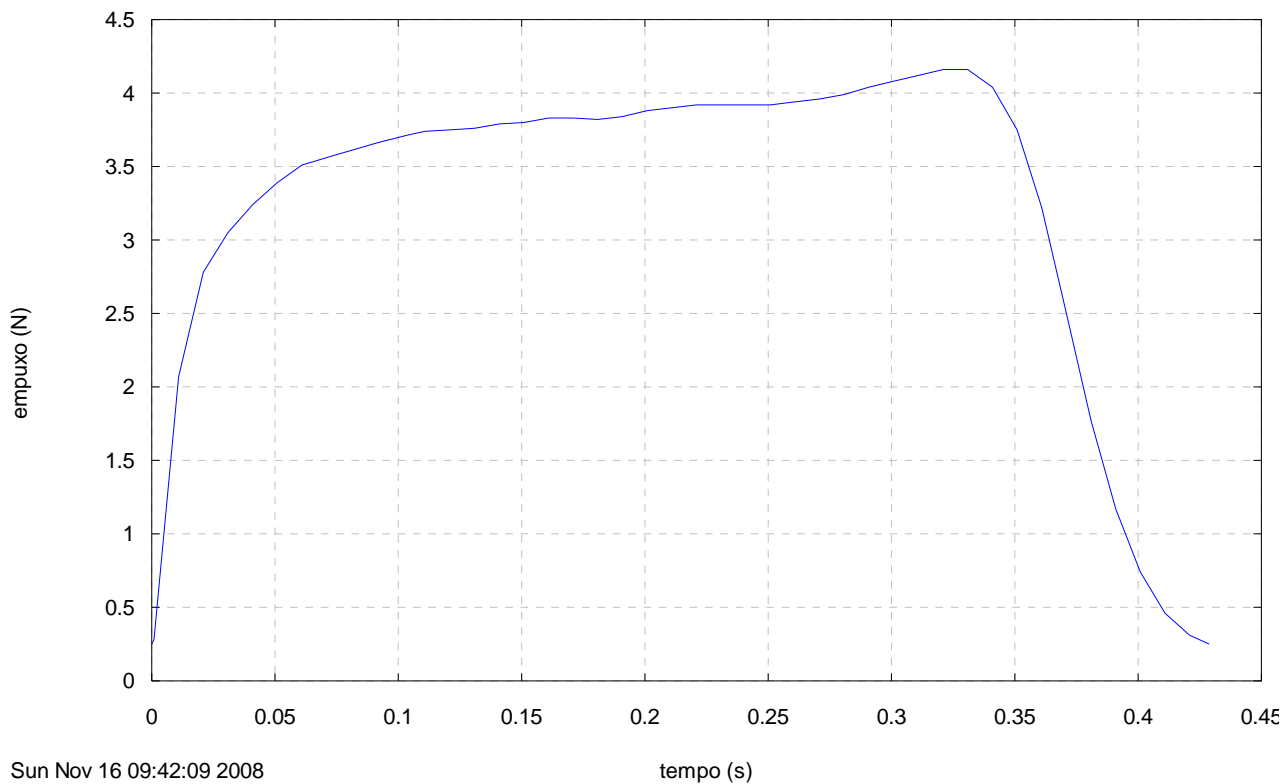
Motor SE-32, TE 5 Mai 2008, CURVA\_EMPUXO 1.2

**Figura 35. Curva empuxo versus tempo processada do motor-foguete SE-32.**

Motor SE-36, TE 13 Out 2008, CURVA\_EMPUXO 1.2

**Figura 36. Curva empuxo versus tempo processada do motor-foguete SE-36.**

Motor SE-53, TE 13 Out 2008, CURVA\_EMPUXO 1.2

**Figura 37. Curva empuxo versus tempo processada do motor-foguete SE-53.**

Nas Tabelas 3 e 4 são apresentados os principais 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 6 a 37.

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

<b>Motor</b>	<b>tq (s)</b>	<b>Emed (N)</b>	<b>It (Ns)</b>	<b>Classe</b>	<b>Is (s)</b>
SE-1	0,411	3,55	1,46	A 4	21,9
SE-3	0,373	7,71	2,88	B 8	30,3
SE-4	0,438	3,36	1,48	A 3	19,9
SE-5	0,431	3,23	1,39	A 3	19,5
SE-6	0,450	3,30	1,48	A 3	21,5
SE-7	0,421	2,53	1,06	½ A 3	17,7
SE-8	0,374	7,62	2,85	B 8	?
SE-9	0,364	7,82	2,84	B 8	?
SE-10	0,362	7,89	2,86	B 8	?
SE-12	0,550	4,03	2,21	A 4	23,7
SE-13	0,404	6,60	2,66	B 7	28,7
SE-14	0,540	4,33	2,34	A 4	22,3
SE-15	0,381	7,05	2,69	B 7	27,0
SE-16	0,413	3,70	1,53	A 4	17,9
SE-17	0,429	3,28	1,40	A 3	19,3
SE-18	0,416	2,58	1,08	½ A 3	17,7
SE-19	0,392	7,15	2,80	B 7	29,7
SE-20	0,408	6,87	2,80	B 7	28,5
SE-21	0,384	7,44	2,86	B 7	29,4
SE-22	0,389	7,17	2,79	B 7	28,6
SE-23	0,374	7,49	2,80	B 7	29,6
SE-24	0,391	7,20	2,82	B 7	28,5
SE-25	0,573	3,77	2,16	A 4	20,2
SE-26	0,389	6,70	2,60	B 7	25,3
SE-27	0,414	6,78	2,81	B 7	26,3
SE-28	0,379	7,56	2,87	B 8	30,2
SE-29	0,388	7,11	2,76	B 7	?
SE-30	0,392	7,21	2,82	B 7	30,7
SE-31	0,652	4,41	2,87	B 4	31,2
SE-32	0,367	7,85	2,88	B 8	30,5
SE-36	0,415	3,56	1,48	A 4	21,1
SE-53	0,429	3,28	1,41	A 3	19,5

O significado dos símbolos da Tabela 3 é o seguinte: tq = tempo de queima; Emed = empuxo médio; It = impulso total; classe = classificação do motor, conforme NAR (2004); e Is = impulso específico médio. O valor de tq foi obtido diretamente de cada curva empuxo *versus* tempo processada. Os demais parâmetros foram obtidos por meio das seguintes equações:

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

$$It = \int_0^{tq} E dt \quad (4)$$

$$I_s = \frac{c}{g} \quad (5)$$

onde  $c$  = velocidade de ejeção efetiva média dos gases, dada por

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

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

Motor	E <sub>max</sub> (N)	$\frac{E_{max}}{E_{med}}$	$\frac{E_{min}}{E_{max}}$ (%)	f <sub>m</sub> (g/s)	c (m/s)
SE-1	4,90	1,38	5,11	16,53	214,6
SE-3	10,91	1,42	2,29	26,00	296,6
SE-4	4,70	1,40	5,31	17,29	194,6
SE-5	4,16	1,29	6,01	16,90	191,2
SE-6	4,20	1,27	5,95	15,68	210,4
SE-7	3,47	1,38	7,20	14,59	173,1
SE-8	11,01	1,44	2,27	?	?
SE-9	11,09	1,42	2,25	?	?
SE-10	11,21	1,42	2,23	?	?
SE-12	5,70	1,41	4,39	17,37	231,8
SE-13	9,30	1,41	2,69	23,51	280,6
SE-14	5,75	1,33	4,34	19,86	218,1
SE-15	10,52	1,49	2,38	26,66	264,5
SE-16	5,14	1,39	4,86	21,14	174,9
SE-17	4,49	1,37	5,57	17,32	189,3
SE-18	3,54	1,37	7,06	14,93	173,0
SE-19	10,10	1,41	2,47	24,63	290,4
SE-20	10,36	1,51	2,41	24,61	279,0
SE-21	10,80	1,45	2,31	25,82	288,1
SE-22	10,08	1,41	2,48	25,62	279,7
SE-23	10,70	1,43	2,34	25,86	289,6
SE-24	10,26	1,42	2,44	25,85	278,6
SE-25	5,66	1,50	4,41	19,02	198,1
SE-26	9,92	1,48	2,52	27,04	247,8
SE-27	10,48	1,55	2,38	26,36	257,3
SE-28	10,69	1,41	2,34	25,57	295,7
SE-29	11,82	1,66	2,11	?	?
SE-30	11,40	1,58	2,19	23,98	300,7
SE-31	9,53	2,16	2,62	14,41	305,7
SE-32	11,45	1,46	2,18	26,33	298,1
SE-36	4,77	1,34	5,24	17,28	206,1
SE-53	4,16	1,27	6,01	17,14	191,2

Na Eq. (4),  $E$  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. (5),  $g$  é a aceleração local da gravidade; o valor usado foi  $9,7876 \text{ m/s}^2$ .

Pode-se ver na Tabela 3 que os 32 motores testados se enquadram em apenas três classes, conforme o intervalo de impulso total:  $\frac{1}{2}A = 0,626$  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.



O significado dos símbolos da Tabela 4 é o seguinte:  $E_{max}$  = empuxo máximo;  $E_{min}$  = empuxo mínimo, fixo em 0,25 N; e  $f_m$  = fluxo de massa médio do propelente. O valor de  $E_{max}$  foi obtido diretamente de cada curva empuxo *versus* tempo. Os demais parâmetros foram obtidos por meio das equações já apresentadas e com

$$f_m = \frac{M_p}{t_q} \quad (7)$$

## 5 DISCUSSÃO

A Tabela 5 sintetiza os valores mínimos e máximos, e suas variações, das Tabelas 1, 3 e 4. Pode-se perceber que há grande dispersão entre os valores de todos os parâmetros. Lembra-se que todos os motores são do mesmo fabricante e de um mesmo tipo. Portanto, em princípio, o desempenho de todos os motores deveria ser mais homogêneo, sem tanta dispersão.

**Tabela 5. Mínimos e máximos.**

Parâmetro	Mínimo	Máximo	<u>Máximo</u> <u>Mínimo</u>
Mo (g)	14,00	18,52	1,32
Mf (g)	6,16	8,05	1,31
Mp (g)	6,15	10,91	1,77
tq (s)	0,362	0,652	1,80
Emed (N)	2,53	7,89	3,12
It (Ns)	1,06	2,88	2,72
Classe	½ A3	B8	---
Is (s)	17,7	31,2	1,76
E <sub>max</sub> (N)	3,47	11,82	3,41
f <sub>m</sub> (g/s)	14,41	27,04	1,88
c (m/s)	173,0	305,7	1,77

Não parece haver uma correlação direta ou simples entre o tempo de queima e a massa de propelente, conforme pode-se ver nas Tabelas 1 e 3. Mas, a partir dos dados de tq na Tabela 3, obtém-se

$$\overline{t_q} = 0,422 \pm 0,135 \text{ s} \quad (8)$$

Este valor médio de 0,422 s para tq foi obtido com base em 32 valores. Já a incerteza expandida (U), cujo valor é 0,135 s, foi obtida através do procedimento descrito em ABNT (1997), para fator de abrangência  $k = 2,04$ , resultante de 31 graus de liberdade e distribuição t para nível de confiança

de 95%, conforme recomendação de JHT (1993). Portanto, em 19 casos de 20, o valor de  $t_q$  deve ficar entre 0,287 e 0,557 s. O valor de  $U$  representa 32% de  $\overline{t_q}$ .

A diferença entre  $\overline{t_q}$  e  $t_q$  mínimo é de 0,060 s, que representa 14% de  $\overline{t_q}$ . Considerando esta diferença de  $t_q$ , apenas quatro motores tiveram  $t_q$  fora do intervalo de 0,362 a 0,482 s, com valores maiores do que 0,482 s. A título de comparação, o motor Estes B6 apresenta 17% de incerteza no seu  $t_q$ .

Parece que quanto maior a frequência de aquisição dos dados, mais oscilações são captadas nas curvas de empuxo. Para a maior frequência usada (400 Hz), as curvas correspondentes das Figuras 8 a 18 têm muito mais oscilações do que as curvas das Figuras 36 e 37 cuja frequência foi de 100 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 31 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 2,2 a 2,7 vezes o do motor SE-31, que teve o melhor  $I_s$  (31) entre os 32 testados.

A Figura 38 apresenta o resultado experimental do impulso total ( $I_t$ ) *versus* massa de propelente ( $M_p$ ) para 28 motores cujo  $M_p$  é conhecido. Está claro que o  $I_t$  depende de  $M_p$ . Com base nestes resultados, foi feito um ajuste linear por mínimos quadrados, que resultou na seguinte expressão:

$$I_t = 0,402M_p - 1,38 \quad (9)$$

onde  $M_p$  é dado em gramas e  $I_t$  em N.s. Pode-se ver na Figura 38 que apenas dois dentre 28 resultados experimentais estão fora do desvio de  $\pm 20\%$ .

A partir das Eqs. (5), (6) e (9), pode-se obter

$$c = 402 - \frac{1380}{M_p} \quad (10)$$

$$I_s = 41,1 - \frac{141}{M_p} \quad (11)$$

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.

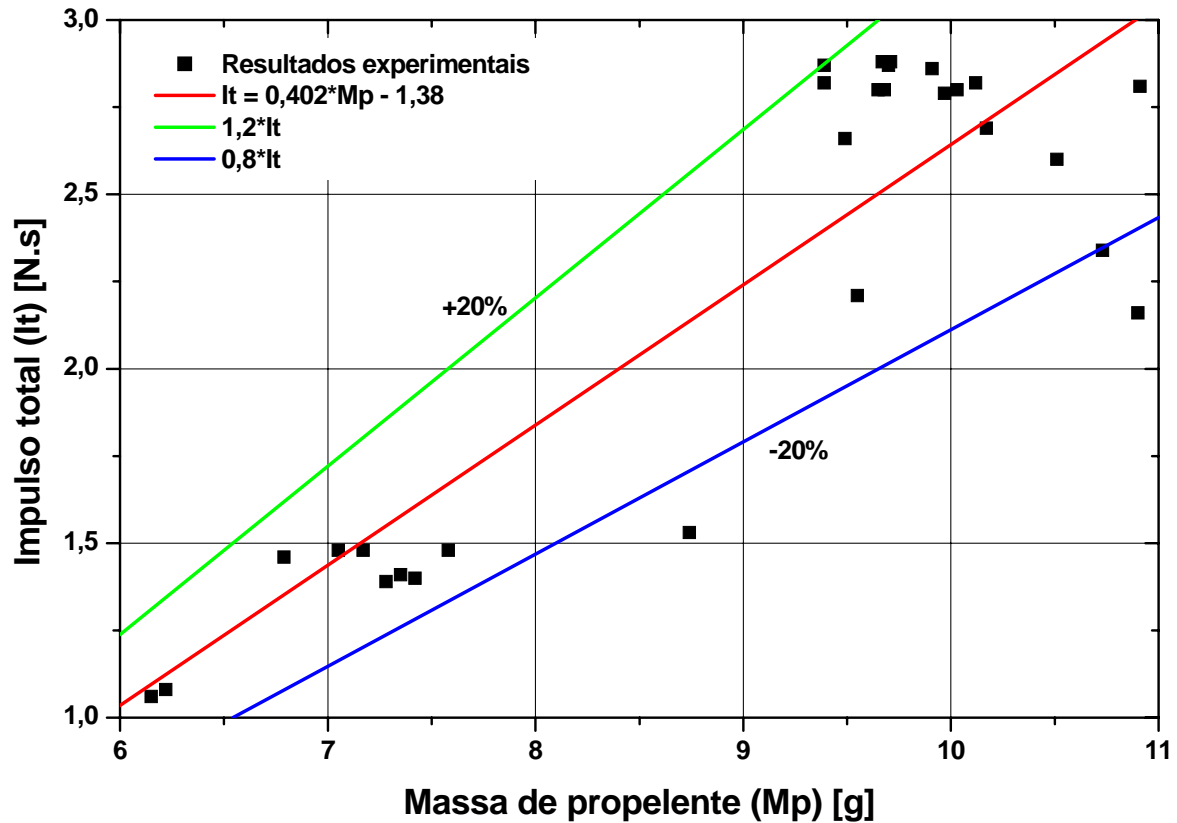


Figura 38. Impulso total *versus* massa de propelente.

## 6 CONCLUSÃO

Com base nos 32 testes estáticos relatados neste trabalho:

- 1) Obteve-se um valor médio ( $\overline{M_f} = 7,56$  g) para a massa final dos motores, dado pela Eq. (2), com incerteza expandida de 10%.
- 2) Obteve-se um valor médio ( $\overline{t_q} = 0,422$  s) para o tempo de queima dos motores, dado pela Eq. (8), com incerteza expandida de 32%. Mas 88% dos motores apresentaram  $t_q$  dentro de um desvio de até 14% do  $\overline{t_q}$ .
- 3) Verificou-se que os motores ficaram entre as classes  $\frac{1}{2}A3$  e B8.
- 4) Verificou-se que o impulso específico ficou entre 18 e 31 s.
- 5) Obteve-se uma correlação empírica, Eq. (9) e Figura 38, que prevê o impulso total ( $I_t$ ) em função da massa de propelente ( $M_p$ ).

- 6) Conclui-se que a qualidade deste tipo de motor SE é baixa pois há grande dispersão no seu desempenho.

Recomenda-se usar a incerteza de  $\pm 20\%$  do It para fazer previsões de trajetória. Assim, com a massa total ( $M_0$ ) do motor antes da queima e  $\overline{Mf}$  da Eq. (2),  $M_p$  pode ser obtido da Eq. (1).

Seria importante desenvolver um modelo teórico para comparar com a Eq. (9).

## 7 AGRADECIMENTOS

À memória de Basílio Baranoff, que forneceu gratuitamente os motores-foguete usados nos testes estáticos.

Aos alunos da disciplina “Projeto e lançamento de espaçomodelos”, lecionada nos semestres letivos 2006/2, 2008/1 e 2008/2 no curso de graduação em engenharia mecânica da Universidade Federal do Paraná, e ao então aluno Paulo R. Chiquito pela obtenção de alguns dados da Tabela 1.

À profa. Ana Sofia C. M. D’Oliveira, que permitiu utilizar a balança Gehaka.

Ao prof. Luciano K. Araki, que auxiliou nos testes, realizando a ignição dos motores.

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.

Ao CNPq (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico - Brazil) pelo apoio financeiro.

## 8 REFERÊNCIAS

ABNT. **Guia para expressão da incerteza de medição**. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas, 1997.

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.

MARCHI, C. H. **Testes estáticos de motores-foguete a propelente sólido de espaçomodelos de 5 Out 2006**. Curitiba: Universidade Federal do Paraná, 2007. 24 p.

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