

Capítulo 2. MOTOR-FOGUETE DE ESPAÇOMODELO

2.1 COMPONENTES DO MOTOR-FOGUETE

O esquema da Figura 1 mostra a estrutura típica de um motor-foguete de espaçomodelo (EM). Seus componentes são:

- Parede: a parede do motor geralmente é um tubo cilíndrico circular feito de papelão, fenolite ou plástico. É a estrutura principal e maior do motor.
- Carga propulsora: é a carga principal de propelente que ao ser consumida gera a força de empuxo (E) do motor. Geralmente o propelente é pólvora negra e é um bloco maciço. Os motores são disparados eletricamente através de um sistema de ignição e um ignitor pirotécnico, mostrados na Figura 2.
- Tubeira: é uma estrutura que idealmente é formada por um bocal do tipo convergente-divergente; mas em motores de espaçomodelos, geralmente não existe o bocal convergente e a garganta (região com menor diâmetro) é um tubo. A finalidade da tubeira é aumentar a pressão dos gases que resultam da queima do propelente dentro do motor. A tubeira também é usada para aumentar a velocidade com que estes gases saem do motor. Assim, a tubeira aumenta o empuxo produzido pelo motor. Geralmente a tubeira é de cerâmica.

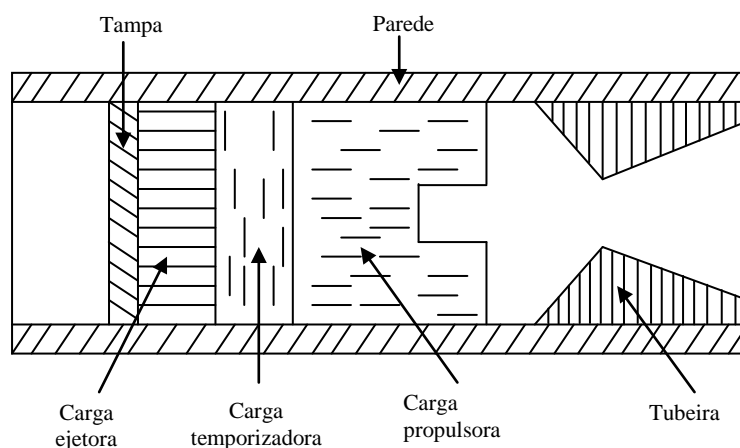


Figura 1. Componentes do motor-foguete de espaçomodelo.

- Carga temporizadora: é uma carga pequena de propelente que é consumida lentamente e gera pouquíssimo empuxo. Ela é usada para existir um determinado intervalo de tempo entre a queima das cargas propulsora e ejatora. Geralmente é um bloco maciço.
- Carga ejatora: é uma carga muito pequena de propelente que é consumida rapidamente. Sua finalidade é ejetar o sistema de recuperação do espaçomodelo, que geralmente é um paraquedas ou fita. Geralmente é na forma granulada.
- Tampa: é usada para manter a carga ejatora em seu lugar. Geralmente é feita de isopor ou papelão e é móvel.

Existem motores do tipo booster que só têm a carga propulsora. Eles não têm as cargas temporizadora e ejatora. Neste caso, a tampa é fixa e feita de cerâmica ou resina.

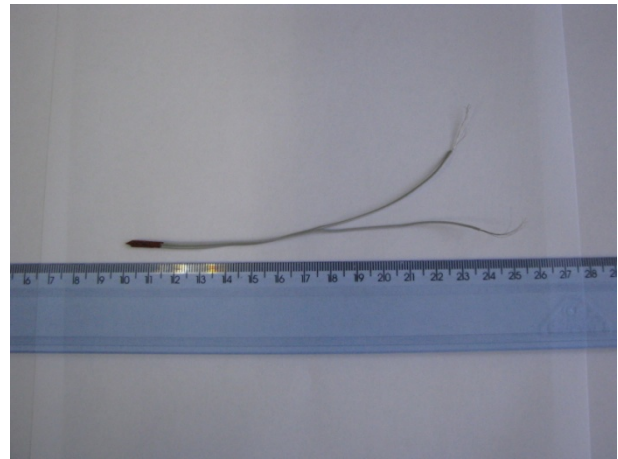


Figura 2. Sistema de ignição do tipo Quest e ignitor do tipo Bandeirante.

2.2 CLASSIFICAÇÃO DOS MOTORES

De acordo com a Associação Nacional de Espaçomodelismo (National Association of Rocketry – NAR), dos Estados Unidos, os motores de espaçomodelos são classificados com um código composto por (NAR, 2004):

Código dos motores: Letra Número1 – Número2

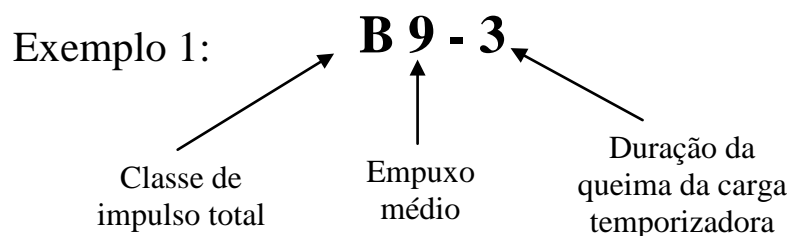
- A letra indica a classe de impulso total (I_t) do motor, em newtons-segundos [N.s], conforme a Tabela 1.
- O primeiro número indica o valor do empuxo médio (E_{med}) aproximado do motor, em newtons [N].

- O segundo número indica a duração aproximada, em segundos [s], da queima da carga temporizadora.

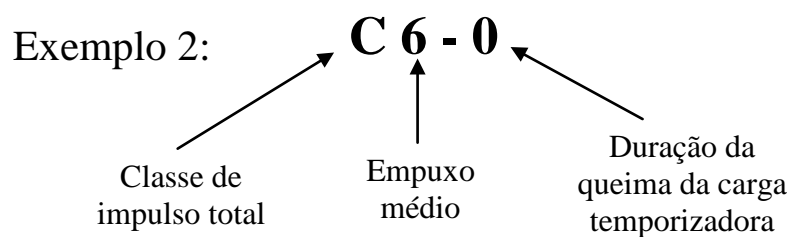
Geralmente estes números são arredondados para números inteiros.

Tabela 1. Classificação dos motores (NAR, 2004).

Classe do motor	Impulso total (It) [N.s]
$\frac{1}{8}$ A	0,00 a 0,3125
$\frac{1}{4}$ A	0,3126 a 0,625
$\frac{1}{2}$ A	0,626 a 1,25
A	1,26 a 2,50
B	2,51 a 5,00
C	5,01 a 10,00
D	10,01 a 20,00
E	20,01 a 40,00
F	40,01 a 80,00
G	80,01 a 160,00



O motor deste exemplo 1 tem impulso total no intervalo de 2,51 a 5,00 N.s. Seu empuxo médio é de aproximadamente 9 N. E a duração da queima da sua carga temporizadora é de aproximadamente 3 s.



O motor deste exemplo 2 tem impulso total no intervalo de 5,01 a 10,00 N.s. Seu empuxo médio é de aproximadamente 6 N. E a duração da queima da sua carga temporizadora é zero. Isso significa que este motor é do tipo booster, tendo apenas a carga propulsora (ele não têm as cargas temporizadora e ejetora).

Na Figura 3 são mostradas as tubeiras de motores-foguete Bandeirante do tipo C6-5. Na Figura 4 pode ser vista a tampa de fechamento de isopor, a carga ejetora e a carga temporizadora.



Figura 3. Foto mostrando as tubeiras de motores-foguete Bandeirante do tipo C6-5.



Figura 4. Fotos mostrando a tampa de fechamento, a carga ejetora e a carga temporizadora de motores-foguete Bandeirante do tipo C6-5.

As Figuras 5 a 7 mostram as três fases da queima do propelente de um motor-foguete Bandeirante do tipo C6-5, ou seja, a queima da sua carga propulsora, seguida pela queima da sua carga temporizadora e finalizando com a queima da sua carga ejetora.

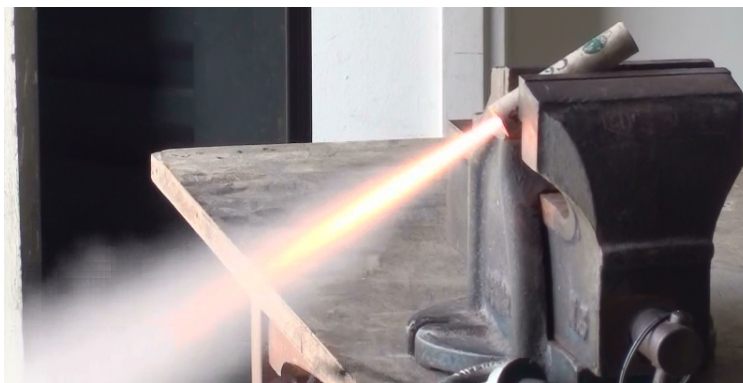


Figura 5. Foto mostrando um motor Bandeirante C6-5 durante a queima da sua carga propulsora.



Figura 6. Foto mostrando um motor Bandeirante C6-5 durante a queima da sua carga temporizadora.



Figura 7. Foto mostrando um motor Bandeirante C6-5 durante a queima da sua carga ejetora.

2.3 CURVA DE EMPUXO

A curva de empuxo (Figura 8) é uma curva que representa a força propulsiva (empuxo E) produzida pelo motor-foguete a cada instante de tempo (t). Sua forma depende da geometria do grão-propelente. A curva de empuxo também pode ser chamada de curva empuxo-tempo ou curva de empuxo *versus* tempo.

Grão-propelente: é um bloco sólido que se constitui no propelente armazenado na câmara de combustão do motor. Alguns tipos de grãos podem ser vistos na Figura 9; entre parênteses são indicados os nomes dos minifoguetes ou foguetes que usam cada tipo de grão. Dependendo do tipo de grão, ou se sua geometria, as curvas de empuxo podem ser do tipo regressiva, neutra ou progressiva, conforme é mostrado na Figura 10.

As curvas de empuxo de motores-foguete são obtidas experimentalmente através de testes estáticos. Neste tipo de teste, usa-se uma banca experimental (Figura 11), composta por um berço para o motor e uma célula de carga (transdutor ou sensor de força). Um sistema de aquisição de dados computacional obtém os valores do empuxo durante a queima (Figura 12) do propelente do motor.

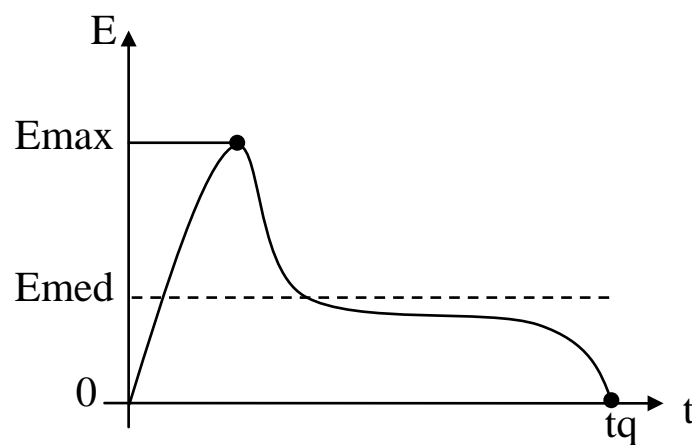


Figura 8. Curva de empuxo típica do motor-foguete de um espaçomodelo.

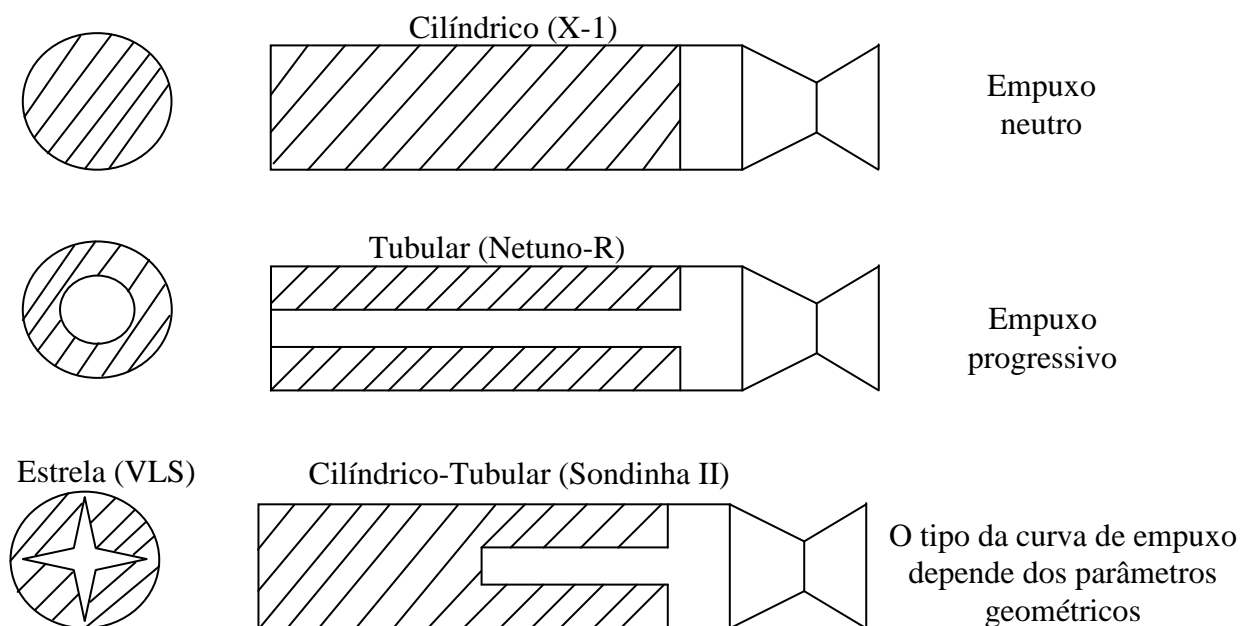


Figura 9. Tipos de grãos-propelente.

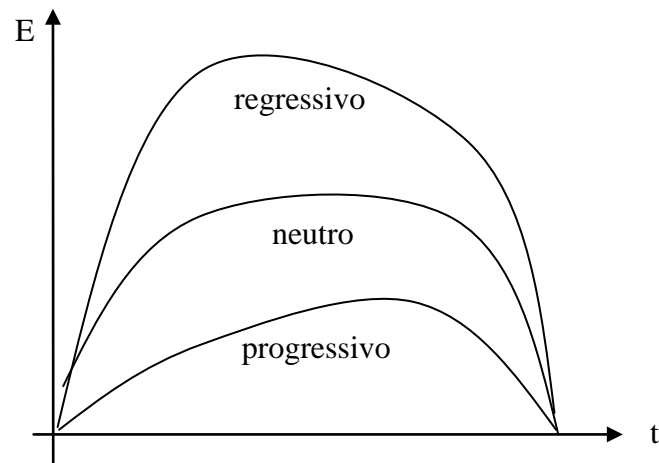


Figura 10. Curvas de empuxo típicas de foguetes.

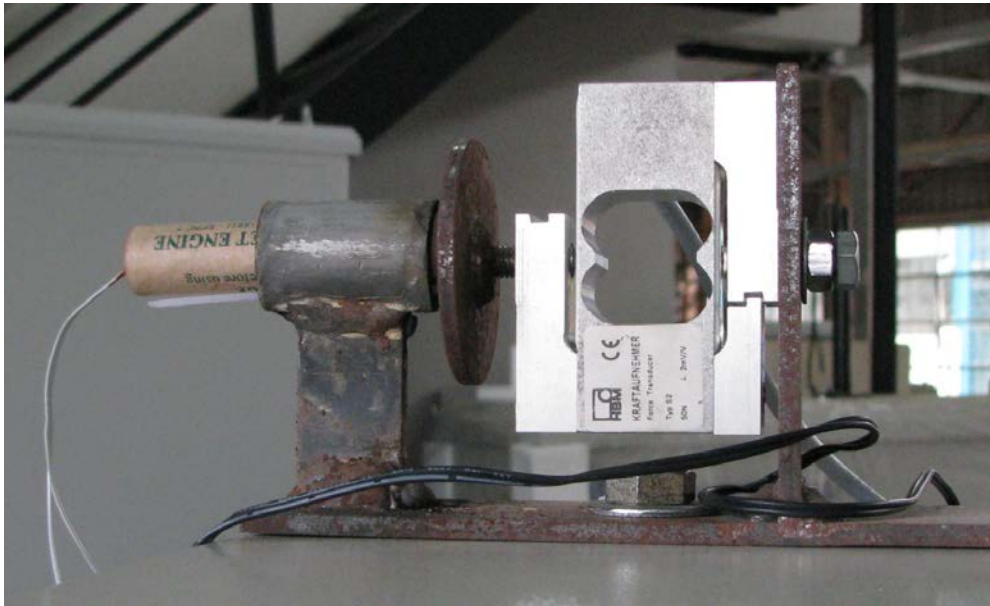


Figura 11. Foto de bancada experimental para obter a curva de empuxo de um motor-foguete de espaçomodelo preparado para o teste estático, já com o ignitor.



Figura 12. Foto mostrando um motor-foguete Bandeirante do tipo C6-0 em funcionamento durante a aquisição de dados de sua curva de empuxo em banco estático.

Nas Figuras 13 a 17 são mostradas curvas de empuxo de motores Bandeirante de testes estáticos realizados pelo Grupo de Foguetes Carl Sagan, da UFPR. Outros resultados, incluindo fotos e vídeos, podem ser vistos na internet no endereço: ftp://ftp.demec.ufpr.br/foguete/Testes_estaticos/.

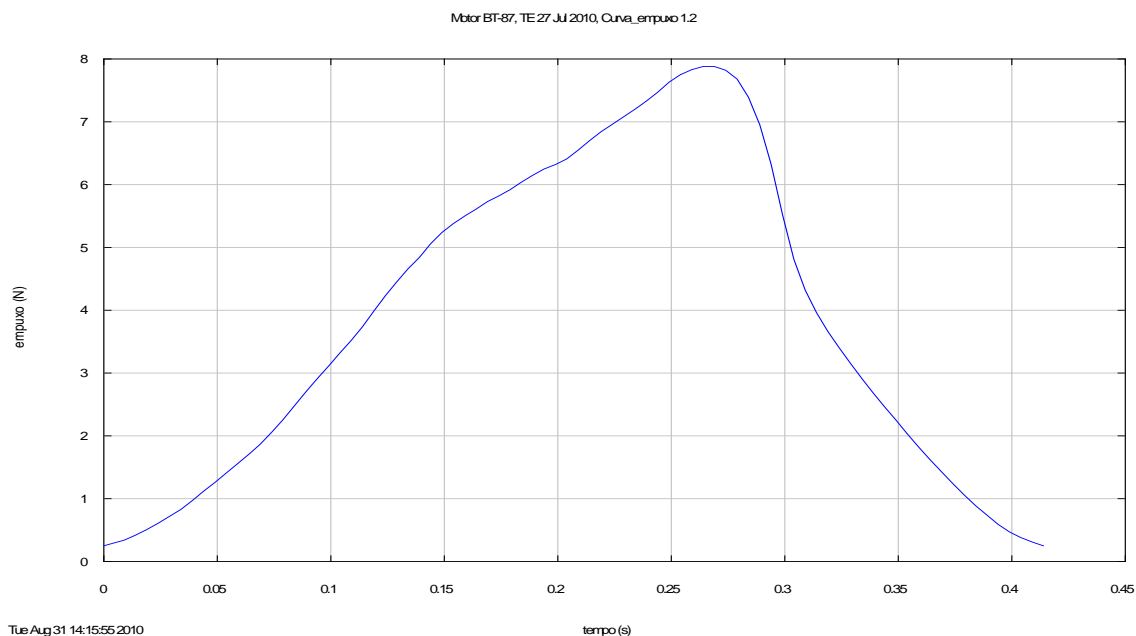


Figura 13. Curva empuxo *versus* tempo de um motor-foguete Bandeirante do tipo A6-0.

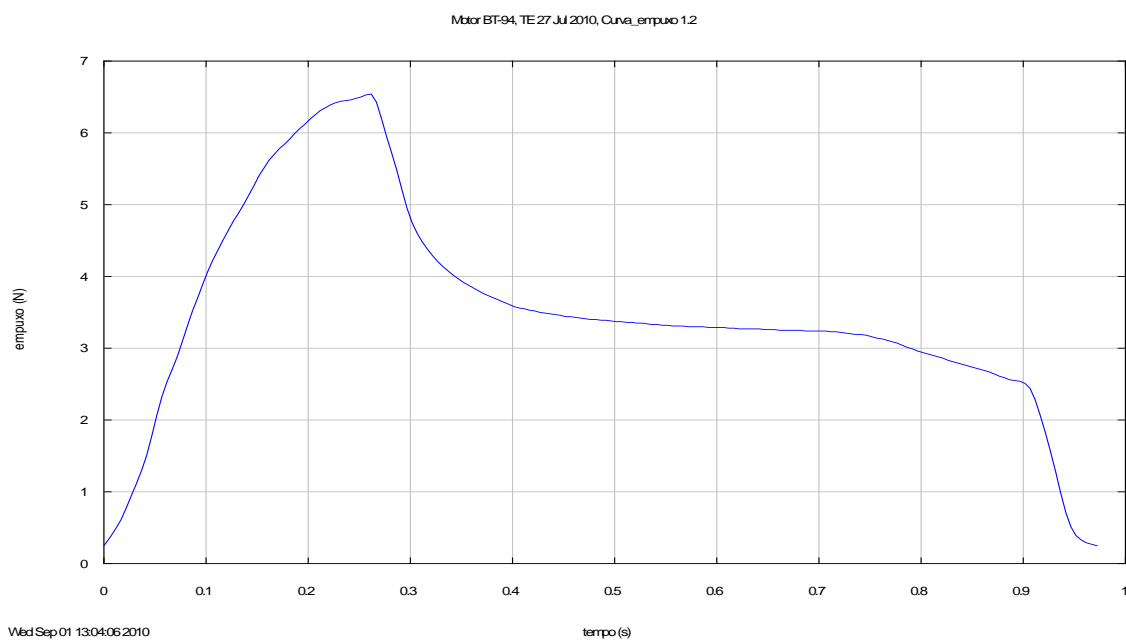


Figura 14. Curva empuxo *versus* tempo de um motor-foguete Bandeirante do tipo B6-0.

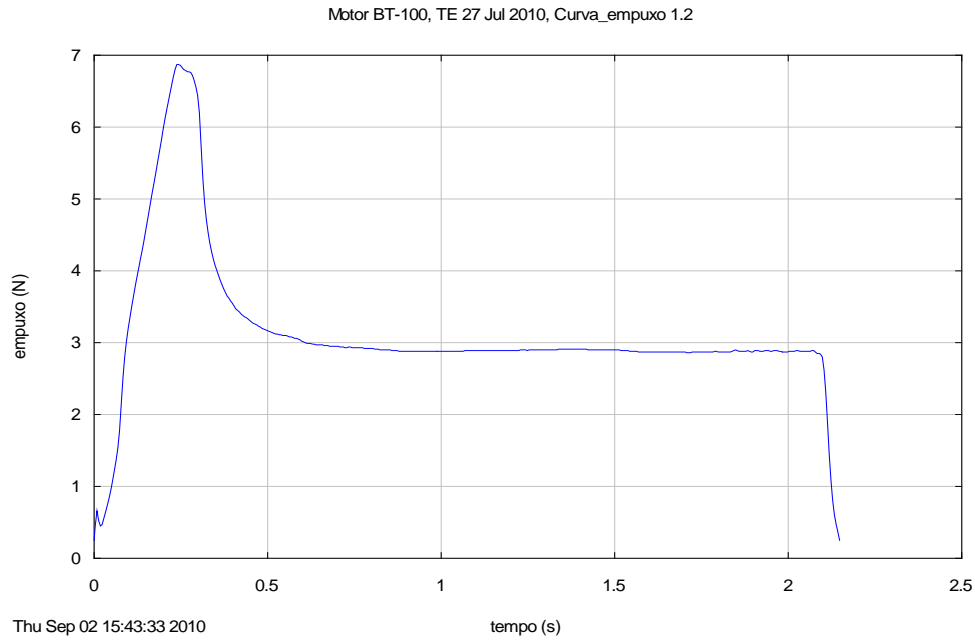


Figura 15. Curva empuxo *versus* tempo de um motor-foguete Bandeirante do tipo C6-0.

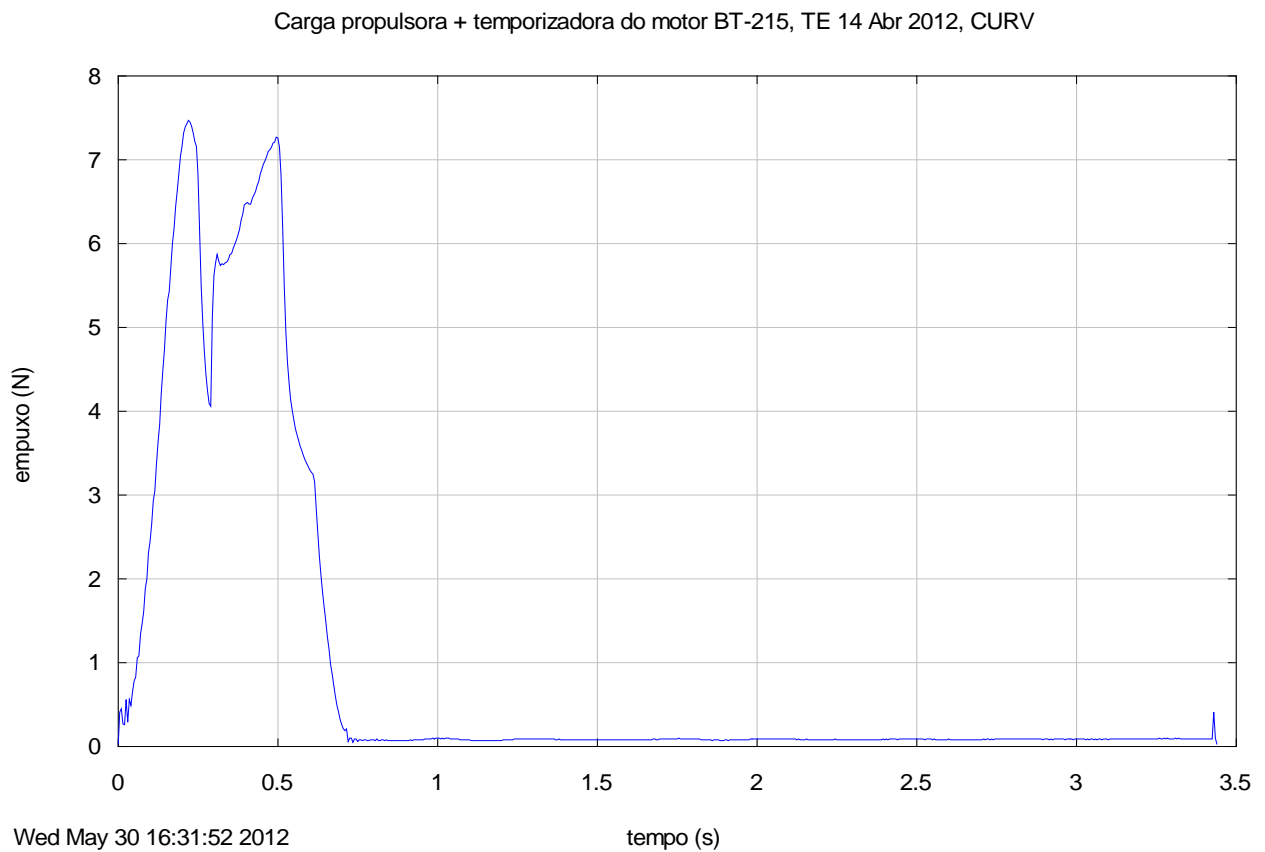


Figura 16. Curva empuxo *versus* tempo de um motor-foguete Bandeirante do tipo B6-4.

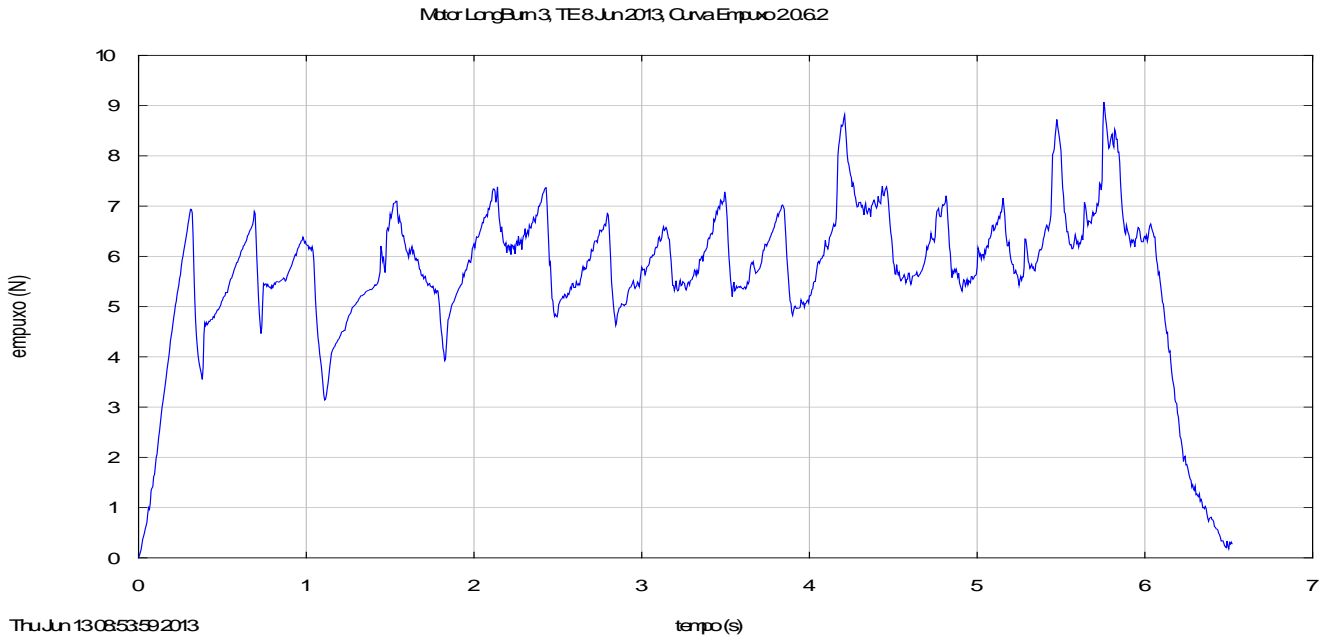


Figura 17. Curva empuxo *versus* tempo de um motor-foguete Bandeirante do tipo E6-0.

2.4 PARÂMETROS DA CURVA DE EMPUXO

A Figura 8 mostra uma curva de empuxo típica ou característica de espaçomodelos. Em geral, o empuxo máximo (E_{max}) é atingido logo no início da queima, sendo razoavelmente maior do que o empuxo médio (E_{med}). Em seguida, o empuxo se reduz para um patamar próximo do empuxo médio e permanece assim até o fim da queima do propelente. O símbolo t_q representa o tempo de queima do grão-propelente.

Impulso total (It): é a quantidade de movimento (massa x velocidade) total produzida pelo motor. O It é a integral da curva de empuxo, definida por

$$It = \int_0^{t_q} E \, dt \quad [N.s] \quad (2.1)$$

Empuxo máximo (E_{max}): é o valor máximo de empuxo da curva de empuxo.

Empuxo médio (E_{med}): é o valor de empuxo que multiplicado pelo tempo de queima (t_q) resulta no It . É definido por

$$E_{med} = \frac{I_t}{t_q} \quad [N] \quad (2.2)$$

Velocidade média de ejeção dos gases (c): é a velocidade média dos gases na saída da tubeira do motor. É definida por

$$c = \frac{I_t}{M_p} \quad [m/s] \quad (2.3)$$

onde M_p é a massa total de propelente no motor [kg].

Impulso específico médio (Is): é uma medida da eficiência global do motor. Seu valor representa o empuxo produzido durante um segundo por unidade de peso de propelente consumido. É definido por

$$I_s = \frac{I_t}{M_p g} = \frac{c}{g} = \frac{E_{med} t_q}{M_p g} \quad [s] \quad (2.4)$$

onde g é a aceleração gravitacional ao nível do mar ($9,80665 \text{ m/s}^2$).

Fluxo de massa médio (fm): é a quantidade de massa de propelente consumida por unidade de tempo. É definido por

$$f_m = \frac{M_p}{t_q} \quad [kg/s] \quad (2.5)$$

A NAR (2014) mantém uma lista (<http://www.nar.org/SandT/NARenglist.shtml>) de motores comerciais de espaçomodelos que são certificados para uso, nas diversas classes de motores. Outra lista de motores pode ser vista em www.thrustcurve.org. Ambas as listas apresentam curvas de empuxo dos diversos motores e seus parâmetros principais.

Exemplo: a Tabela 2 apresenta os dados principais do motor [Apogee A2-0,3,5,7](#), bem como os resultados calculados com as Eqs. (2.2) a (2.5) a partir dos seus dados.

Tabela 2. Parâmetros do motor Apogee A2-0,3,5,7.

Dados	Resultados
$I_t = 2,47 \text{ Ns}$	$E_{med} = 1,89 \text{ N}$
$t_q = 1,31 \text{ s}$	$c = 823 \text{ m/s}$
$M_p = 0,0030 \text{ kg} = 3,0 \text{ g}$	$I_s = 84 \text{ s}$
$g = 9,80665 \text{ m/s}^2$	$f_m = 2,3 \text{ g/s}$

2.5 PROPELENTES DE MINIFOGUETES

Alguns tipos de propelentes de minifoguetes são os seguintes:

- Minifoguete experimental X-1: micrograin = 67% Zn (zinco) + 33% S (enxofre). $I_s \sim 30 \text{ s}$
- Minifoguete experimental Netuno-R: KNSu = 35% $\text{C}_{12}\text{H}_{22}\text{O}_{11}$ (sacarose) + 65% KNO_3 (nitrato de potássio). $I_s = 50 \text{ a } 100 \text{ s}$
- Espaçomodelos: pólvora negra = 14% C (carvão) + 14% S (enxofre) + 72% KNO_3 (nitrato de potássio). $I_s = 60 \text{ a } 100 \text{ s}$.
- Composite = Al (alumínio) + NH_4ClO_4 (perclorato de amônia) + CTPB (polibutadieno carboxilado). $I_s = 150 \text{ a } 180 \text{ s}$ (espaçomodelos), e $220 \text{ a } 280 \text{ s}$ (foguetes).
- Como referência, em foguetes a propelente líquido: $I_s = 250 \text{ a } 350 \text{ s}$.

2.6 REFERÊNCIAS

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

www.nar.org (2014).

www.thrustcurve.org (2009).

2.7 EXERCÍCIOS (considerar $g = 9,80665 \text{ m/s}^2$)

2.1 Com I_t , t_q e M_p do motor [Estes ½A6-2](#), calcular E_{med} , c , I_s e f_m .

2.2 Com I_t , t_q e M_p do motor [Quest A6-4](#), calcular E_{med} , c , I_s e f_m .

2.3 Com I_t , t_q e M_p do motor [Estes B6-0,2,4,6](#), calcular E_{med} , c , I_s e f_m .

2.4 Com I_t , t_q e M_p do motor [Quest C6-0](#), calcular E_{med} , c , I_s e f_m .