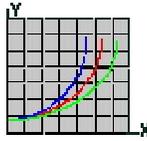


# Web site de foguetaria experimental de Richard Nakka



## Teoria de motor-foguete sólido

### 7 Impulso e C-Estrela

#### Impulso Total

Embora o *empuxo* seja um critério importante para caracterizar a *capacidade de sustentação* de um motor-foguete, ele não fornece indicação do quão alto o foguete será propelido. Para isto, precisa-se de uma medida da *energia total* em termos de capacidade de propulsão. A medida essencial para isto é o **Impulso Total** do motor-foguete, que incorpora o elemento essencial do tempo, ou a duração do empuxo.

O Impulso Total é definido como a integral no tempo do empuxo sobre a duração de operação do motor:

$$I_t = \int_0^{t_b} F dt \quad (7.1)$$

e é representado pela área sob a curva empuxo-tempo da Figura 7.1.

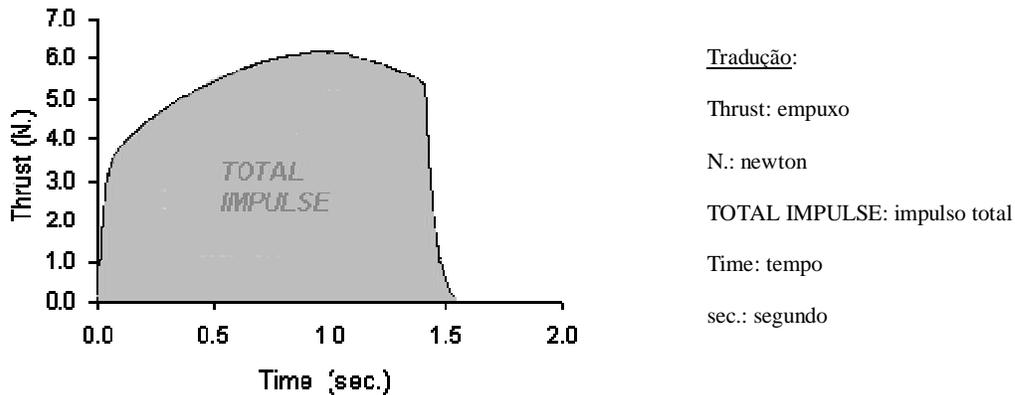


Figura 7.1 Curva empuxo-tempo para um motor típico.

As unidades são aquelas de força multiplicada pelo tempo, tipicamente libra-segundo (lb.s) ou Newton-segundo (N.s).

É importante notar que o Impulso Total diz somente uma parte da história quanto a capacidade de um motor propelir um foguete em direção ao céu. Por exemplo, um motor que produz um Impulso Total de 200 lb.s pode fornecer um empuxo médio de 100 lb por 2 segundos (100 lb.s x 2 s = 200 lb.s), ou pode produzir um empuxo de 25 lb por 8 segundos (25 lb.s x 8 s = 200 lb.s), como mostrado na Figura 7.2. Ambos produzem o mesmo Impulso Total, que é geralmente abreviado por  $I_t$ .

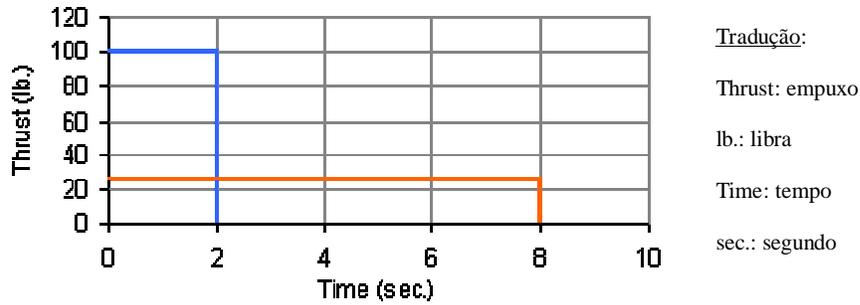


Figura 7.2 Curva empuxo-tempo e impulso total.

A altitude obtida diferirá de algum valor, com este efeito sendo mais significativo com a redução da razão empuxo/massa. A diferença mais pronunciada será com a aceleração do foguete, já que a aceleração inicial ( $a$ ) é dada por

$$a = \frac{F}{m} - g \quad (7.2)$$

onde  $F$  = empuxo,  $m$  = massa de decolagem do foguete, e  $g$  = aceleração da gravidade. Com aceleração menor, maior o tempo que o foguete leva para obter uma velocidade na qual as empenas fornecem estabilidade efetiva. E no caso extremo, se o empuxo é menor do que o peso de decolagem, o foguete nem mesmo deixará a rampa de lançamento, independentemente do Impulso Total do motor!

### Velocidade Característica

A *velocidade característica*, também chamada *c-estrela* ou simplesmente  $c^*$ , é uma figura de mérito termoquímica para um propelente particular e pode ser considerada um indicativo da *eficiência da combustão*. A expressão para *c-estrela* ideal é dada na Equação (7.3), e é visto ser uma função só dos produtos da combustão ( $k, M, T_o$ ).

$$c^* = \sqrt{\frac{T_o R' / M}{k \left( \frac{2}{k+1} \right)^{\frac{k+1}{k-1}}} \quad (7.3)$$

O valor usado para  $k$  deve ser aquele para a mistura de gases e fase condensada, como mostrado na *Web Page Bloco de Notas Técnico*.

O Impulso Específico produzido está relacionado a *c-estrela* como segue:

$$I_{sp} = \frac{c^* C_f}{g} \quad (7.4)$$

onde  $c^*$  estima a influência da combustão e  $C_f$  (coeficiente de empuxo) estima a influência da tubeira. Assim,  $c^*$  pode ser considerado análogo ao impulso específico com  $C_f = 1$ .

O *c-estrela* resultante pode ser obtido de uma curva pressão-tempo do motor-foguete, sendo dado pela integral no tempo da pressão de câmara sobre a queima, multiplicada pela razão entre a área da garganta e a massa de propelente, como mostrado na Equação (7.5).

$$c^* = \frac{A_t}{m_p} \int_0^{t_b} P(t) dt \quad (7.5)$$

Para motores com KN/Açúcar, o *c-estrela* resultante concorda bem com o valor calculado, indicando alta eficiência da combustão.

### **Impulso Específico**

O **Impulso Específico** que um propelente é capaz de produzir (teórico ou “resultante”) é o “critério” chave do desempenho potencial. Em sua forma básica, o Impulso Específico pode ser considerado relacionar o *empuxo produzido* por uma *unidade de massa* (por exemplo, 1 lb ou kg) de propelente sobre o *tempo de queima de um segundo*. Assim, as unidades de Impulso Específico seriam lb.s/lb ou N.s/kg. No primeiro conjunto de unidades, “lb” se cancela, dando a unidade mais convencional de “segundos”. Para o último conjunto de unidades, a divisão de Impulso Específico em N.s/kg pela aceleração gravitacional  $g$  (9,806 m/s<sup>2</sup>) resulta no mais convencional “segundos”.

O Impulso Específico *resultante* produzido por um motor, por exemplo de medidas de teste estático, é obtido da expressão:

$$I_{sp} = \frac{I_t}{w_p} \quad (7.6)$$

onde  $w_p$  é o peso do propelente (lb ou kg x g)

O impulso específico tem uma dependência de:

- fluxo de massa, e então do tamanho do motor
- energia disponível da combustão do propelente
- eficiência da tubeira
- condições de pressão ambiente
- perda de calor para a estrutura do motor
- perdas de escoamento bifásico
- eficiência da combustão

Estes fatores são discutidos em detalhe na *Web Page Correções para Motores-Foguete “Reais”*.

O **Impulso Específico Ideal** de um propelente de foguete é calculado usando a Equação (5.15) da *Web Page Teoria de Tubeira*, que expressa a velocidade de exaustão  $v_e$  em termos das propriedades do escoamento e a razão de pressão. Como  $v_e = c^*C_f$ , o  $I_{sp}$  ideal pode ser determinado da Equação (7.4):

$$I_{sp} = \frac{1}{g} \sqrt{\frac{2k T_o}{k-1} \left(\frac{R'}{M}\right) \left[1 - \left(\frac{P_e}{P_o}\right)^{\frac{k-1}{k}}\right]} \quad (7.7)$$

onde  $k$ ,  $M$ ,  $T_o$ ,  $P_e$  e  $P_o$  são todos definidos na *Web Page Teoria de Tubeira*. Esta equação é utilizada para calcular o Impulso Específico Ideal para propelentes KN/Açúcar, como mostrado nas *Web Pages Bloco de Notas Técnico*.